2100科技大未來

從現在到2100年，科技將如何改變我們的生活

本書將解答您對人類未來生活的所有疑惑！

「超弦理論」奠基者、Discovery《科幻成真》節目主持人
加來道雄(Michio Kaku)／著
張水金／譯

Physics Future

現在。你看得見未來！

Physics of the Future:
How Science Will Shape Human Destiny and
Our Daily Lives by the Year 2100

時報出版 next

目錄

各界盛讚　現在，這本書，讓我們看得見未來！

文化界：

張系國（科幻小說家）

詹偉雄（學學文創副董事長）

藍祖蔚（資深影評人）

科技界：

李怡志（Yahoo!奇摩媒體服務整合總監）

林之晨（appWorks之初創投合夥人）

詹宏志（PChome網路家庭董事長）

趙藤雄（遠雄建設董事長）

劉威麟（知名網路趨勢專家）

戴季全（TechOrange.com/科技報橘創辦人暨執行長）

教育界：

王道還（生物人類學者）

高涌泉（台灣大學物理系教授）

孫維新（台灣大學物理系與天文物理研究所教授）

徐爵民（工業技術研究院院長）

張慶瑞（台灣大學物理系教授）

蔣偉寧（教育部長）

媒體界：

王文靜（商周媒體集團執行長）

何飛鵬（城邦集團首席執行長）

吳其勳（《iTh ome》總編輯）

黃哲斌（資深媒體工作者）

鄭國威（PanSci泛科學網總編輯）

鄭緯筌（《數位時代》研究主編）

我想像到了二一○○年，除了個人興趣之外，大部分現在看到的工作都不用真人操作，而且人類也不需要為了溫飽而勞動。創造力取代財富，成為人類最重要的資產，每個人的身分不是詩人、作家、畫家，就是歌手、舞者或導演，每天不是創作就是表演，希望這是科技永遠無法取代，依舊需要人類心智的「工作」，不管是在二一○○年的地球故鄉，或者在宇宙無盡探索的航行中。科學家依舊重要，但從事社會創新的科學家與從事科技創新的科學家或許會一樣多。

——李怡志（Yahoo!奇摩媒體服務整合總監）

深入淺出，用人們可以了解的語言和比喻，描述了科技發展的最前線，和未來人們的生活。

——林之晨（appWorks之初創投合夥人）

本書從科學發展的蛛絲馬跡大膽勾勒未來百年的人類生活，如真如幻，發人深省。

——徐爵民（工業技術研究院院長）

二十世紀的科技發展跟不上人類創意，本書預告了二十一世紀則將是創意不足限制科技發展的時代，物理學將帶領人類進入歷史的極限。

——張慶瑞（台大物理系教授）

我們都渴望預視未來，此書以科學而非神祕學，以知識邏輯而非符籙占卜，為我們揭示明日科技的水晶球。

——黃哲斌（資深媒體工作者）

舞動右腦的想像力，一起進入既科幻又真實的未來世界。

——蔣偉寧（教育部部長）

會拿起這本書，相信你大概不是會聽信二○一二世界末日說的人，但若你更進一步，真的想知道未來百年人類生活會如何受科技發展影響，那麼這本立基在實際研究，由貨真價實的一流科學家所寫的「預言書」，是非看不可了。有別於科幻小說或是未來學，加來道雄用紮實的科學研究根基與親身採訪，將未來一百年的樣貌鋪陳在我們眼前，但人類到底能不能走到那一刻，需要我們做出正確的選擇。

——鄭國威（PanSci泛科學網總編輯）

為了未來行動——本書提供未來世界的可能選項，而結果由我們的行動決定。二一○○年三大重要的趨勢與變革（可能）是：一，利潤的概念消失。二，代議政治轉變為即時的直接決議。三，三十五歲以下的我們，活得好好的。

——戴季全（TechOrange.com／科技報橘創辦人暨執行長）

這是一本讓影癡歎服的書，作者不但愛看科幻電影，而且信手拈來，所有的科幻情節，不但得到了理性的解讀與背書，也用了感性的溫潤筆法，書寫了人的追尋、迷航與失落。人類因有夢想而不朽，只有夢想才能摔脫地心引力的羈絆，對創作者而言，電影是夢想的實踐；對觀眾而言，電影則是夢想的啟發。讀這本書，則是兩者兼備，原本只是科幻電影的炫技素材，已然有了人生築夢的溫度了。

——藍祖蔚（資深影評人）

推薦序／預見未來的起點

朱敬一（行政院國科會主任委員）

要寫《二一○○科技大未來》這樣的書，當然是極不容易的。如果拿此書與不久前出版的《看得到的世界史》（A History of the World in 100 Objects）一書比較，我認為編寫此書更為困難。《看得到的世界史》是由大英博物館館長策劃。再加上英國BBC的影視專業，搭配上百位全球藝術史權威的詮釋，才能將大英博物館中九十九件經典器物，賦予精采的解說。然而歷史畢竟是靜態的、過去的，其詮釋是知識理解多、預測想像少。但是要解析二一○○年的未來科技，卻不是要處理已知的過去，而是要預見各種科技發展的潛在走勢，其難度不言可喻。科技研發的任務就是要探索未知；既然是未知、既然要探索，就表示事前難以預測。從這個角度來看，這本書的撰寫，幾乎是個不可能的任務。即使是對有相當知識基礎與科普經驗的加來教授來說，也是件艱鉅的任務。

要談科技未來的另一項難處，在於科學分工極細，越是尖端前緣的知識，越是隔行如隔山。加來教授是物理學者，由他來描繪廣義的物理世界未來，包括奈米科技、電腦科技、人工智慧、能源科技、太空科技，相對而言比別人是有知識基礎的。作者在這些方面的前景描繪，確實能提綱挈領，精準掌握前緣脈動。但是，當討論的主題跨入生物醫學、資本主義、人類的未來這一類主題時，我作為讀者就會發現若干與我的理解或預測相扞格之處。例如，當作者說，未來「人類複製可能會存在。不過他們只占人類的一小部分，所產生的社會影響也很小」，我就有相當不同的看法。人類複製所衍生的衝擊是或零或一的，其影響絕不與「複製千分之一的人」或「複製萬分之一的人」而有多少不同。只要有複製人，問題就絕對是一籮筐，一個也少不了。其次，對於基因科技能否逆轉老化、終結生命上限，我的生物學知識也有與本書不同的推論。這件事就算是純生物學的推理作者去問物理學天才費曼（Richard Feynman），恐怕也只有參考作用。

對加來教授這樣的物理學家而言，二一○○年最難預測的當然不是科技，而是「社會」。本書第七章討論資本主義的未來、第八章談行星文明、第九章想像二一○○年的生活一瞥，這都需要對社會運作的深刻理解，甚至加上一點哲學判斷與想像；這是自然科學家最弱的一環。例

如，作者感慨普林斯頓大學的聰明心智不去處理物理與數學難題，而投注於「投資銀行」這種不令人尊敬的行業，是一個「衰敗的訊號」。我自己也很不看不起那群專搞財務工程的、專門製造財富不均的投資銀行小道研究者，但是我對於經濟社會會怎麼運作、社會上哪些人會投注於哪些領域，自有一套「尊重的」思考邏輯。我認為天道無親，數學與物理未必是高尚的開路者，更不表示其他門道是「衰世之學」。讀者讀這本書，必須要有健康的心理建設。

總之，在自然、生命、社會、人文的大知識洪流中，要預測二一○○是極為困難的。要寫好這樣的書，作者需要（一）距離：不能習慣性地太接近自己的科技專業；（二）鳥瞰：要能從大角度大視野俯視全局；（三）想像：對於鳥瞰所無法盡觀的諸多角度要多發揮想像；（四）理想：無論如何客觀，都還要有一些道德面、哲學面、人文面的理想期待。要兼擁前述四種能力與視野的作者，古今中外絕無僅有。在我看來，加來道雄教授已經具有相當的功力，庶幾近矣。由他寫此書，已經是為讀者提供了一個相當理想的起點，幫助讀者在二○一二年，盡量去理解與想像自己或自己子孫所即將面對的未來，將會是什麼景象。

推薦序／看見未來的未來

陳國華（淡江大學未來學研究所專任副教授）

加來道雄寫的書一直都是很值得期待和閱讀的，本來就不需用太多篇幅來為此書寫推薦，所以這篇短文，就當成是我對此書的讀後心得分享吧。簡單來說，加來道雄的著作主要有兩大方向，其一為普及科學知識，另一類為科技未來研究，兩者提供的思路觀點相輔相成。但是前一類書的書名常常是很令人聞之卻步的，例如：《穿梭超時空》（Hyperspace）、《平行宇宙》（Parallel Worlds）和《電影中不可能的物理學》（Physics of the Impossible）等。第二類書就真的很親民了，像是十多年前出版的《NEXT 20 years and after》（Visions），如果你讀過那本書，你更會被現在這本《2100科技大未來》所吸引，因為加來道雄在預測科技進展對未來人類文明的影響架構下，加入了多樣化的人文、哲學、藝術和創新教育等延伸問題的發想，讀者更可以感受到他擁抱知識、面對智慧時的謙遜。我們可以這麼說，加來道雄的這部新作除了提供知識，也融入了相當的膽識與故事。

通常除非必要，例如課堂作業或工作企畫，大多數人都不太願意想像未來，反正船到橋頭自然直，想多了就常遭致杞人憂天之譏，或是常因選擇越多反而只是帶來猶豫而非快感。但矛盾的是，人們又偏偏與生具有好奇心、喜歡探索和預測未來的本事，而且不論其準確度如何，我們從小就被師長們「訓練」於運用此能力來推測日常生活規則、計畫教育方向、找尋工作和人生夥伴，以至於功成名就。另在「正途」之外，我們也常被媒體吸引而關心星座運勢、股匯趨勢、房市行情，乃至於風雨氣象、國家競爭力和全球布局等等議題。不可否認的，上述這些當下性和時間線性的未來觀往往限制了我們看見未來的潛力，因為我們透過世代之間的教育和文化傳衍，不經意地把看見未來的本事慣性化了，也就是我們已逐漸習慣於使用二手的未來，小至個人、大至國家社會都很難避免「複製」後「貼上」的行為模式。

不過也總是有些人喜歡挑戰思維複製的慣性，我簡稱這種想像力為「看見未來的未來」——這句話裡的第一個未來（前未來）是時空的直線延伸，第二個未來（後未來）則是心靈和思考層次的超越。而加來道雄則偏好較為精準的描述，他將未來進展分為世紀初期（現在—二○三

○）、世紀中期（二○三○─二○七○）和遙遠未來（二○七○─二一○○）。為了方便我這種非科學內行者的思考，我將三個階段分為當下、前未來和後未來。本書提供了三百多位頂尖、內行科學家的經驗實證知識，讓我們大開眼界的「認識」我們即將面對的當下和前未來。但我覺得在閱讀的過程中，加來道雄呈現的後未來情節推演，更刺激我們「思考」陌生境界的另類可能，思考現在的我們很可能都將不存在的另一個世紀（界）的多重樣貌。我覺得加來道雄的重要發現是：未來的關鍵應是智慧（第八章），他認為科學經常是創造未來的利器，但關鍵在於找到揮舞科學之劍所需的智慧。更引述愛因斯坦（Albert Einstein）所言：「科學只能決定是什麼，而不能決定應當是什麼；超越這個範圍，價值判斷不可或缺。」

我曾於一九九九年在西雅圖參加由未來基金會（Foundation for the Future）主辦、以「Humanity 3000」為主題的研討會上，首次受到加來道雄演講對於我教學工作的啟蒙，他用一張模擬圖片，解釋未來二十年後參加考試的學生，將能透過類隱形眼鏡，在網路上搜尋答案，這對於過去偏重教授背誦知識的我們來說，勢必將學習重點改放在思考與推論能力的培養。隔年，我意外成功地邀請他到淡江大學的未來學國際會議作專題演講。有別於其他重量級科學家的謹慎回應，他很簡單爽朗的回答：why not?出於好奇心。

最後，我分享本書可能引人深思的一些較趨近後未來的探索觀點：

☆奇點（singularity）：探討心靈機器的年代，人工智能何時會超越人類本身。

☆克隆（clone，複製）是好萊塢電影偏好的主題，但它們往往使科學倒退。即使可能，它們所產生的社會影響也很小。

☆如果我們要探索太陽系，居住在不適合居留的星球，基因增強也可能是無可避免的。

☆老年學（Gerontology）原本暮氣沉沉，現在變成了熱門領域，吸引好幾億美元的研究經費，甚至提高了商業化的可能性。

☆我們一定會死嗎？

☆奈米自我組成機器如果成真，那將是歷史上最大的失控時刻，然後世界會產生難以想像的演變。

☆當化石燃料逐步消失時，在外太空生產太陽能電力，將是個重要的替代能量來源。

☆你千萬別幻想人類殖民於月球和火星，能使我們立刻獲得巨大經濟利益。

☆未來的電腦，最終將進入第四階段——它將消失，而以時髦的方式復活……未來都市垃圾最大成分將非紙張，而是晶片。

☆公司的金字塔將會扁平化，在未來，中間人將如何存活？他們必須能對工作提供附加價值，並提供機器人所無法提供的有價值之物：判斷力。

☆從事藝術的人、小說家、編劇將會有工作，因為他們會鼓舞、誘發、喚起情緒，必須傳達真實的情境、人性衝突和人類的成與敗。

☆智慧資本主義…是廣闊光譜的各種活動，包含創造力、藝術能力、創新、領導力和分析能力。

☆科學是有組織的知識，智慧是有組織的人生。

這本書除了可以啟發許多人對於「看見未來的未來」的潛力外，它應該也跟許多經典科幻小說一樣具有同等價值，會隨著時空和人類知識的推演，不斷接受檢證和刺激思考。

導讀／專家眼中的未來

曾耀寰（中央研究院天文及天文物理研究所研究副技師）

科學家的預測和算命仙的預言有何不同？不都是猜測未來的趨勢、未來的走向，甚至是未來的災難，例如《推背圖》第五象讖曰：楊花飛，蜀道難，截斷竹簫方見日，更無一史乃平安，說的就是唐代的安史之亂。《推背圖》相傳是唐太宗李世民命兩位名士所著，分別是唐初司天監的李淳風，以及隱士袁天罡。司天監就是中國古時候的天官，任職天官的人可算是皇家御用天文學家。李袁二人根據周易八卦寫了六十象，原是要推算唐朝運勢，明末清初金聖嘆作序批注，每一象僅有讖語四句、「頌曰」四句、金聖嘆評注一段以及插圖一幅。以第五象插圖為例，插圖左邊是一馬鞍，右邊是一冊史書，下方是一婦人橫躺在地。金聖嘆評說，馬鞍和史書分別是指安史之亂的安祿山和史思明，而婦人是指死於馬嵬坡的楊貴妃。看圖講古，真是好一個金聖嘆為觀止。

也許你會認為西方的科幻小說是否會高明些？德國天文學家克卜勒（Johannes Kepler）寫的《夢遊記》（Somnium）可算是近代科幻小說的先驅。《夢遊記》的故事描述月球之旅，由一位來自月球的精靈將主人翁帶到月球，《夢遊記》雖然和登陸月球相關，但也只是將當時的科學事實和想像力揉合在一起。一八六五年法國作家凡爾納（Jules Verne）寫了本《從地球到月球》（From the Earth to the Moon），這部小說將凡爾納對未來想像發揮到極致的境界。《從地球到月球》是寫人類以巨型加農炮的方式，將人送上月球。小說描述了整個升空的過程，活像是現今太空梭發射的模樣，甚至還仔細地介紹如何回收太空艙。一些人也許會無限上綱地據此推論，現在發表天馬行空的言論，不保未來也有實現的可能。殊不知，凡爾納並不是憑空想像，他是不停地拜訪科學家，追問當時科學家對未來科技的看法，才能完成這樣逼真的科幻小說。

一九九六年，美國《紐約時報》（The New York Times）做了未來一百年的生活專輯，雖不像《推背圖》記載重要的歷史事件，但也算是前瞻性的預言，野心不小。但專輯文章的作者卻只有新聞記者、社會學家、作家、時裝設計師、藝術家和哲學家，獨缺專業的科學家，可真是非常地生活化，就像我們電視節目「關鍵時刻」，說得天花亂墜的是一些政

論名嘴。即便是科學家，在現今科學如此高度分化的情況下，沒有相關專業科學根據的說法，也很容易產生偏見。一九四五年，美國海軍總司令對杜魯門（Harry Truman）總統說：「這是我們做過最愚蠢的事……原子彈絕對不可能爆炸。」海軍總司令可算是一名彈道專家，但原子彈需要的是物理學家，而且是一群頂尖的物理學家。同年八月初，美國在日本投下二顆原子彈，不到二個星期的時間，日本宣布無條件投降，原子彈不僅引爆，還推垮整個日本帝國，推翻海軍總司令的斷言。

那麼，除了傳統推背圖類型的預言，或者引人入勝的科幻小說外，我們是否有辦法做到合理的未來預測？這便是本書的主要目的。作者加來道雄是紐約市立大學的理論物理學家，也是美國著名的科普作家、科普節目的主持人，參與許多的科普傳播活動。早在十多年前（一九九八），加來道雄就曾出版一本類似的未來科技預言書籍《NEXT 20 years and after》。這兩本科技預言的特色不僅是擁有理論物理背景的科學家作者，還有作者加來道雄不斷強調的科學依據，他所作的預言憑藉大量的科學團隊以及最尖端的科技研究和知識，例如在《NEXT 20 years and after》的前言中，列出加來道雄訪談的八十三位科學家，包括四位諾貝爾物理獎得主，一位諾貝爾化學獎得主。加來道雄了解科學高度分化下，隔行如隔山的盲點，藉由參與科學傳播節目製作的機會，親自訪問一流實驗室以及研究團隊，獲得第一手研究成果，這使得他能掌握最新科技的發展以及未來趨勢，作出合理的預測。

基於對科學發展的瞭解，加來道雄將未來科技的發展分成三大類型：量子革命、電腦革命和分子生物革命。二十世紀初最重要的兩項物理發現是量子物理和相對論，相對論是愛因斯坦獨自完成的理論，探討時空和物質交互作用的問題；而量子物理是由一群物理學家共同努力的成果，主要對微觀物理的深刻瞭解。量子物理以機率的方式取代古典物理的決定論，透過量子物理，我們可以對大至宇宙天體的本質，小到夸克的行為模式，都有清楚的解釋。當時的量子理論大師薛丁格（Erwin Schrödinger）更在一九四四年，將量子物理的觸手深進生命科學的領域，想要取代上帝的角色，以細胞分子的遺傳密碼解釋生命的現象。受到薛丁格的啟發，華生（James Watson）和克里克（Francis Crick）找到控制生物遺傳的DNA密碼，進而開展出分子生物學的大門。

此外，在量子物理的基礎之上，科學家發展出了半導體科技，點起了電腦革命之火。電腦不僅只用於高速的計算數字，在現今各個生活角落都

有它的身影，徹底改變人類生活的樣貌。加來道雄從這三個方向深入介紹現今已有的技術以及未來發展趨勢，依照世紀初期、中期以及遙遠未來三個階段，分別做出未來一百年的預測，例如出現在電影《星際大戰》（Star Wars）的3D全像術，他不僅提出、並解釋相關技術的可行性，就像達文西（Leonardo da Vinci）繪製的直升機草圖，除了提供人類飛行的夢想，還讓人有真實感受到人類是可以像小鳥一樣自由地飛翔天際。

最後加來道雄對人類整個文明的未來進展做出預測，主要是和能源的使用以及太空移民有關。人類未來文明的發展一定會走向太空移民，這樣的太空文明又和人類能夠使用的能源有緊密的關連。根據天文學家尼古拉‧卡達謝夫（Nikolai Kardashev）和物理學家弗里曼‧戴森（Freeman Dyson）的定義，外太空文明可分成三種類型，第一型是能掌握該星球所有形式能源的行星文明；第二型則是能掌握星球外的星際能源，可稱為恆星文明；第三型是已經能夠開發鄰近星系的星系文明。根據天文學家卡爾‧薩根（Carl Sagan）的估計，我們人類現在正處在○‧七型文明，到了西元二一○○年，人類文明會進步到第幾類型？那就請讀者從頭看到最後一章〈二一○○年生活一瞥〉，提前嚐鮮人類的未來生活！

引言／預測未來一世紀

未來的帝國，將是心靈的帝國。

——溫士頓‧邱吉爾（Winston Churchill）

孩提時代的兩次經驗，塑造了今日的我，也引發了決定我一生的兩大追求。

第一次發生在我八歲的時候。我記得，那時有一個偉大的科學家去世的新聞剛剛傳開，所有的老師都在低聲地談論著。那天晚上，報紙上登出了他辦公室的照片，桌上還有一張未完成的手稿。標題上說，「當代最偉大的科學家，未能完成他最偉大的傑作。」我問我自己，什麼東西會那麼困難，連最偉大的科學家也無法完成？什麼東西可能那麼複雜、又那麼重要？這個疑問，後來竟比任何神祕謀殺案更加令人銷魂，也比任何冒險故事更加讓我著迷。我必須知道，那張未完成的手稿所探討的到底是什麼。

後來，我發現這個科學家的名字叫做愛因斯坦，而那張未完成的手稿即將成為他在科學成就中的冠冕——他嘗試創立一個「萬有理論」（theory of everthing），一個可能不到一英吋長的方程式，卻可以解開宇宙的祕密，甚至可能容許他「看透上帝之心」。

另一件關鍵性的童年經驗，發生在星期六早晨觀看電視節目時，特別是在巴斯特‧克拉比（Buster Crabbe）主演的科幻連續劇《飛俠哥頓》（Flash Gordon）播放的時候。每個星期六，我的鼻子總是貼近電視螢幕，如夢似幻地進入了外星人、星際旅行艦、雷射槍戰、水底城市以及怪獸等等的神祕世界。我被迷住了。這是我首度見識到未來的世界。從此，每當我在為未來思考時，總是有幾分孩提時代的迷航感受。

然而，看完所有的情節以後，我開始明白，雖然「飛俠」贏得所有的讚揚，事實上真正主宰劇情發展的人卻是札科夫（Zarkov）博士。他發明了火箭船、隱形盾，以及空中城市的電源等等。沒有科學家，就沒有未來。俊男和美女也許會贏得觀眾的欣賞，但未來所有的神奇發明，卻來自在幕後默默奉獻的科學家。

後來，我在就讀高中的時候，決定追隨這些偉大科學家的腳步，並將學習所得付諸實踐。我希望加入這個偉大革命的行列，因為我知道世界將會因它而改變。我決定建造一個原子撞擊機。我問母親可否在車庫建造一個二百三十萬電子伏特的粒子加速器。她有點吃驚，卻也同意了。於是我前往西屋公司和瓦利安公司取得四百磅的變壓器矽鋼片和二十二英里長的銅線，在我媽媽的車庫裡製作一個電子感應加速器。

在這之前，我就曾製造過一個有強大磁場的雲霧室（cloud chamber），拍攝到反物質的軌跡。但是，為反物質攝影已不能滿足我，我現在的目標是要製造出反物質的光束。這個原子撞擊機的磁場圈成功地產生一個一萬高斯（電磁單位）的磁場（約為地球磁場的兩萬倍，剛好可以將你手中的榔頭奪走）。這個機器用電量是六千瓦，耗盡了我家所有的電力。當我打開機器的開關時，我往往會燒毀屋內所有的保險絲。（我可憐的媽媽一定覺得困惑，為什麼她不能擁有一個愛玩橄欖球的孩子。）

就是這兩股熱情激起了我的終生興趣：一是「透過一個單一的統一學說，去了解宇宙所有的物理原則」的渴盼，一是「看見未來」的渴盼。最終，我知道這兩種熱情事實上可以相輔相成。了解未來的關鍵在於掌握自然的基本定律，然後將其運用於能夠重新界定很久以後的文明的發明、機器以及治療。

我發現，已經有很多人曾經嘗試預測未來，其中有些頗為靈驗，也很有啟發性。只不過，這些書大部分都是由歷史學家、社會學家、科幻小說家，以及所謂「未來學家」所寫。也就是說，他們都是不曾擁有第一手科學知識的外行人，卻又能預測科學世界的未來。而科學界真正在實驗室創造出未來的內行人，又由於忙著進行突破性的研究，以致於沒時間為大眾寫出有關未來的書。

這就是為何本書如此的特別。我希望本書能夠就「未來會有什麼奇蹟式的發現」，提供內行人的觀點，也能對二一○○年的世界提出最真實而又權威的洞見。

當然，我們不可能完全正確地預測到未來。我以為，頂多只能打開頂尖科學家的心窗，看看他們為發明未來所作的探索。他們是創造出改革文明的儀器、或發明及提出改善方法的人，而本書所寫的正是他們的故事。我曾有機會坐在此一偉大革命的前排，為全國性電視和廣播網訪問

超過三百個尖端科學家、思想家及夢想家。我也曾帶領電視工作人員，進入他們的實驗室，去拍攝那些將會改變我們未來的非凡器具的原型。我很榮幸地為「BBC-TV」、「Discovery頻道」和「科學頻道」主持過數不清的科學性特別節目，介紹這些有遠見而又敢於開創未來的人，以及他們令人印象深刻的發明和發現。我個人也曾盡情投入弦理論（string theory）的研究，並側面聞知許多即將改變這個世紀的頂尖研究；我可以說是擁有科學界最迷人的工作，而我的童年夢想已經成真。

但此書與我以前出版的那些書有所不同。在《超越愛因斯坦》（Beyond Einstein）、《穿梭超時空》及《平行世界》等書中，我討論我的研究領域（理論物理）中具有新鮮的、革命性的風潮，以打開了解宇宙的新方式。在《電影中不可能的物理學》中，我討論為何最新的物理學發現，將會使科幻小說中最具想像力的花招，最終成為可能。

這本書比較像我的《NEXT 20 years and after》一書。該書探討未來數十年的科學將如何演變。我很慶幸書中所作的許多預言，在今天都已一一應驗。而我的書的準確性，主要是建立在我所訪問過的科學家的智慧和遠見之上。

但是，本書對未來的看法已大幅度擴充，論及未來一百年將會成熟、並最終決定人類命運的科技。我們如何應對未來一百年的挑戰與機會，也將決定人類發展的終極軌道。

預測未來一世紀非易事

要預測未來數年，已經是沒把握的事，更別說是設想未來一世紀。但正是這種預測，會激發我們去夢想那些有朝一日會改變人類命運的科技。

一八六三年，偉大的法國小說家凡爾納開始進行可能是他最具雄心的計畫。他寫了一本預言式的小說《二十世紀的巴黎》（Paris in the The Twentieth Century），竭盡所能去預告下一個世紀。不幸的是，這份手稿陰錯陽差地失蹤了。當他的曾孫意外地在保險櫃中翻到它時，它被小心地鎖著，躺在那裡而沒被發現已有一百三十年之久。他的曾孫知道自己挖到了寶藏，就安排於一九九四年將這本書出版，結果登上了暢銷書排行榜。

回到一八六三年，當時各國仍在國王或皇帝的統治下，窮困的農民在田園中辛苦耕種。美國陷入毀滅性的南北戰爭，國家幾乎分裂，國力耗盡，而蒸汽機的力量則剛剛開始對世界發動革命。但凡爾納則預言，一九六○年的巴黎將會有玻璃摩天大樓、空調機、電視、電梯、高速火車、汽油發動的汽車、傳真機，甚至還有某種類似網際網路的東西。凡爾納對現代巴黎生活所作描繪的正確性，真是令人難以置信。

這並非僥倖猜中，因為沒過幾年，他又做出驚人的預測。一八六五年，他又寫了一本《從地球到月球》，其中預測了一百多年後的一九六九年太空人征月任務的細節。他正確地預測出太空艙的大小（誤差在少數幾個百分點以內）、發射地點在佛羅里達（離卡納維爾角不遠）、出任務的太空人人數、航行持續時間、太空人將要經歷的無重狀態、以及太空船最後會降落在海中。（唯一的主要錯誤就是：他推測，將太空人帶到月球的是火藥，而非火箭燃料。但問題是，液態燃料還要再等七十年才會發明。）

凡爾納對未來一百年的神準預測，是如何辦到的呢？他的傳記作者說，雖然凡爾納本人並非科學家，但他不停地拜訪科學家，一再地追問他們想像中的未來是什麼樣子的。他為當時的重大科學發現，留下了大量摘要文獻。凡爾納比其他人都知道，科學是撼動文明基礎的引擎，以令人驚奇的事物和奇蹟推動文明進入新世紀。凡爾納形成遠見和深刻洞見的關鍵，在於他深深體會到科學具有改革社會的力量。

另一位偉大的科技預言家是達文西。他不但是畫家、思想家，還是具有遠見的夢想家。在十五世紀末年，他畫出有朝一日要飛上天空的美麗又正確的機器圖解：降落傘、直升機、懸掛式滑翔機、甚至是飛機的素描。令人讚嘆的是，他的很多發明，日後還真的飛上天呢。（不過，他的飛行機器還缺少一個要素：就是具備至少有一馬力的發動機——那種東西還要再等四百年才會有。）

同樣令人驚奇的是，達文西也畫過一個機械式加法機器的草圖，領先時代一百五十年。一九六七年，一張放錯地方的手稿被找出來重新分析，發現他有一個以十三個數字轉輪構成加法機器的想法，只要轉動曲軸，內部的齒輪依序轉動，就能進行加法運算。（一九六八年，有人把機器製造出來，還真的能計算呢。）

一九五○年代，達文西的另一本手稿也被發現。其中有一個穿著日耳曼——義大利盔甲的自動化武士素描設計圖，這位武士能端坐，也能移動手臂、脖子和下巴。同樣地，按照圖樣做出的武士，也真的能發揮作用。

達文西跟凡爾納一樣，願意向當時許多思想先進的人討教，形成自己對未來深刻的洞察力。而他自己也躋身於最先進創新的小圈子之中。此外，達文西經常做實驗，建構並設計模型——這正是任何想要將思想化為現實的人所應具備的特質。

如果我們也有凡爾納和達文西同樣的超常預測能力，我們要問：有可能預測二一○○年的世界嗎？本書將遵循凡爾納和達文西的傳統，去對正在建立會改變我們未來之科技原型的領先科學家們，做近身觀察。本書不是科幻小說，也不是好萊塢劇作家想破頭的副產物，而是植基於今日世界各地主要實驗室中，正在進行的堅實科學。

所有這些科技的原型都已存在。如同《神經漫遊者》（Neuromancer）的作者，也是創造「網際空間」（cyberspace）一詞的威廉‧吉布森（William Gibson）所說的：「未來已經來臨，只不過是分布不均勻。」

預測二一○○年的世界，是一個令人卻步的任務，因為我們正處於一個科學劇變的時代，新發現的腳步越來越快。光是過去數十年科學累積的知識，就已超過整個人類歷史。到了二一○○年，科學知識的數量又會一再倍增。

也許，若要掌握預測未來一百年的巨大改變，最好的方法就是回顧一九○○年的世界，並記得我們的祖父一代所過的生活。

新聞工作者馬克‧蘇利文（Mark Sullivan）請我們想像某人正在閱讀一九○○年的報紙：

> 在一九○○年一月一日的報紙中，美國人讀不到「收音機」之類的辭彙，因為它要再等二十年才會出現；沒有「電影」，因為那也是未來的東西；也沒有「汽車司機」，因為汽車才剛剛出現，被稱為「無馬四輪車……」，那時沒有「飛行員」……農夫沒聽過「拖拉車」，也沒有聯邦儲備系統的「銀行業者」。商人從未聽說過「連

鎖店」或「自助式」；也沒有燃油引擎船的水手……鄉村道路仍然見得到牛的拖拉隊伍……運貨馬車或騾車隨處可見……在栗子樹的樹蔭下打鐵的鐵匠則是真的。

若要了解預測未來一百年的困難，我們就要領會一九○○年的人預測二○○○年的世界的困難。一八九三年在芝加哥的哥倫布世界博覽會有一個活動，請七十四個名人預測未來一百年的世界會是什麼樣子。他們都同樣地犯了一個錯誤，就是低估了科學進步的速度。例如，許多人正確地預言，有朝一日我們會有橫越大西洋的飛船，但是他們都認為它將會由氣球組成。參議員約翰‧英格斯（John J.Ingalls）說：「市民呼叫可以駕駛的飛船，如同我們呼叫四輪輕便馬車與擦鞋僕役一樣平常。」他們也都一樣錯過了即將來臨的汽車。郵政總局局長約翰‧沃納梅克（John Wanamaker）說：「即使一百年以後，美國郵件仍將仰賴驛馬車和馬背運送。」

這種對科學和創新的低估也蔓延到專利局。一八九九年美國專利局局長查爾斯‧杜埃爾（Charles H.Duell）說：「所有能夠發明的，都已經發明了。」

有時候，專家連發生在自己眼前的領域也會看走眼。一九二七年，華納兄弟公司創始人之一的哈利‧華納（Harry M.Warner）在默片時代發表評論說：「誰會願意聽演員說話呢？」

而IBM公司董事長湯馬斯‧華特生（Thomas Watson），也在一九四三年說：「我認為全世界的電腦市場，也許只有五台。」

這種對科學發現的低估，甚至蔓延至令人尊敬的《紐約時報》。一九○三年，萊特兄弟（Wright brother）的飛機在北卡羅來納的小鷹鎮試飛成功前五天，《紐約時報》聲稱，飛行機器的研究只會浪費時間。一九二○年《紐約時報》對火箭科學家羅伯特‧葛達德（Robert Goddard）提出批評，聲稱他的努力沒有意義，因為火箭不能在真空中移動。四十九年後，當阿波羅十一號的太空人登陸月球時，《紐約時報》還給他榮譽，收回以前的批評：「現在已經確定火箭可以在真空中發揮作用，本刊為此一錯誤表示遺憾。」

我們由此得到教訓：與未來對賭是非常危險的。

除了少數例外，對未來的預測往往低估科技進步的速度。我們一再被告知，歷史是樂觀的人，而不是悲觀的人寫出來的。如同前美國總統艾森豪（Dwight D.Eisenhower）說的：「悲觀的人從未贏得戰爭。」

我們甚至也能看到，科幻小說家如何低估科學發現的速度。當一九六○年代製作的《星艦迷航記》（Star Trek）重播時，你會注意到，其中許多「二十三世紀科技」已經出現了。回到當時，電視觀眾看到行動電話、手提電腦、會說話的機器以及能夠聽話的打字機時，都大感驚奇。但是，今天所有的這些科技，都已存在。很快地，我們將會擁有不同款式的全能翻譯機，可以在你說話時，快速地在許多語言之間完成翻譯；還有「三度儀」（tricorder），這種儀器能從遠端診斷疾病。除了超過光速的曲速引擎飛船之外，多數二十三世紀的科學現今都已經出現。

如果以前的人對未來的低估是那麼明顯，我們又如何能為我們的預言，提供較堅實的科學基礎？

了解自然定律

在科學的黑暗時代，閃電和瘟疫被認為是神的傑作，今天，我們已經脫離了黑暗。我們已擁有凡爾納和達文西所沒有的優勢：對自然定律的堅實了解。

預測會經常犯錯，若要儘可能提高其權威性，方法之一就是掌握推動整個宇宙的四種基本相互作用力。每當其中的一種「力」被了解並明確描述時，它就會改變人類的歷史。

第一種被釐清的「力」是引力（或重力、萬有引力）。牛頓（Issac Newton）給我們一種機制，可以解釋物體是藉由力而非神祕的精靈或形上學的影響而產生移動。這一機制幫忙這個世界鋪上通往工業革命的路，也帶來了蒸汽力，特別是火車頭。

第二種被理解的「力」是電磁力。它照亮了我們的城市，並賦予家用電器力量。當愛迪生（Th omas A.Edison）、法拉第（Michael Faraday）、馬克士威（James C.Maxwell）以及其他人幫忙解釋電力與磁力以後，電力革命的力量被釋放出來，創造了許多神奇的科學產物。每次停電，我們都會看到，社會突然倒退一百年的不便。

第三和第四種將被了解的「力」，是兩種核子力：弱作用力和強作用力。當愛因斯坦寫下E＝mc^2時，以及一九三○年代原子分裂時，科學家開始了解點亮天堂的力量。這種力量揭開了恆星背後的祕密。它不僅釋放了原子武器的巨大力量，也允許我們有朝一日可以在地面掌控這個力量。

今天，我們對這四種力，已有相當良好的掌控。第一種作用力（引力），現在可以用愛因斯坦的廣義相對論來描述。其他三種作用力，則由可以用能夠解開次原子世界祕密的量子論來描述。

量子論，它依次為我們帶來電晶體、雷射和數位革命，這些都是現代社會背後的推動力量。同樣地，科學家能運用量子論去解開DNA分子的祕密。生物科技革命的快速進展，乃是電腦科技的直接結果，因為DNA的排序全部是由機器、機器人以及電腦完成的。

因為這些發展，我們比較容易看到未來一百年的科技發展方向。雖然還是會有完全出乎意料的驚奇，讓我們目瞪口呆，但現代物理學、化學和生物學的基礎大部分都已建立，我們也不預期這些基本知識會有重大的修正（至少在可以預見的未來）。所以，我們在本書所作的預測，並非任意猜測，而是針對今日已有的科技原型，合理地推估它們最終達到成熟的時間。

總而言之，以下的幾個理由可以相信，我們可以看到二一○○年世界的輪廓：

一、本書的基礎是建立在對三百個以上頂尖科學家的訪問之上，而他們都有最領先的新發現。

二、本書所提及的每一件科學發展，都不違反已知的物理定律。

三、四種基本作用力和基本的自然律大部分已經揭曉；我們並不預期這些規律會有重大翻新。

四、所有本書提及的科技原型都已存在。

五、本書的作者是一個「內行人」，他對這些頂尖科技都做過第一手觀察。

從遠古以來，我們都是被動地觀看著自然之舞。我們只能以驚奇和畏懼的眼光去看待彗星、閃電、火山爆發和瘟疫，以為它們超乎我們的理解。對於古人，大自然是永遠令人害怕和崇拜的神祕力量，所以他們創造了神話中的神，使周邊的世界合理化。古人希望經由對這些神的祈禱，神會顯現慈悲，讓他們熱切的願望得以實現。

今天，我們已經成為自然之舞的編舞者，能夠對自然律稍作調適。但到了二一○○年，我們將開始轉變，成為自然的主宰。

二一○○年：成為神話中的諸神

今天，如果我們還能拜訪我們的古代先人，向他們展示諸多科技成果，我們將會被認為是位魔法師。我們將以科學魔法，讓他們看見高翔雲端的飛機、可以探索月球和其他行星的火箭、可以透視體內的磁振造影機，以及可與地球上任何人聯繫的手機。如果讓他們看到手提電腦，可以在頃刻之間將影像及訊息傳送到大陸的另一端，他們會認為這是魔法。

但這只是開端。科學不是靜態的。它在我們周邊以指數性爆發。如果你計算已經發表的科學論文數量，你會發現數量急遽增加，大約每十年就會倍增。創新與發現正在改變整個經濟的、政治的以及社會的風貌，顛覆傳統所重視的信念和偏見。

現在，讓我們勇於想像二一○○年的世界。

到了二一○○年，我們的命運就是成為我們曾經膜拜和畏懼的神明。但我們的工具將不會是魔術棒與仙丹，而是電腦科學、奈米科技、人工智能、生物科技以及最重要的作為這些科技的基礎量子論。

在二一○○年，如同神話中的神一般，我們將能以我們的念力操控物體。電腦將會悄悄地閱讀著我們的思想，然後實現我們的願望。我們將可以單靠思想，就能移動物體——這種心電感應的能力以前是神的專利。運用生物科技的力量，我們將會創造出完美的身體並延長壽命。我們也將能夠創造出地球上前所未有的生命形式。我們將可以運用奈米科技的力量，將某種物體轉換成另一種東西，好像是無中生有地創造出東西。我們不會像神一般駕馭火紅的戰車，卻有流線型的車子，幾乎不用

燃料就能不費力地漂浮空中。我們的引擎將能運用恆星上無盡的能源。我們快要可以送出星船去探索鄰近的星球。

雖然這種類似神的威力，先進得有點不可思議，但如同前面所說，這些技術的種子都已種下。那是科學為我們帶來這種力量，不靠聖歌或咒語。

我是個量子物理學家。我每天都在和能夠闡明次原子粒子（創造宇宙的基本元素）之間關係的方程式奮鬥。我所居住的世界，是一個十一維度超空間、黑洞以及通往多重宇宙蟲洞的宇宙。雖然量子論的方程式，一向被用來描述星球的爆炸和宇宙的大爆炸，它也可以用來為我們的未來輪廓解碼。

但所有的這些科技變化將引領我們走向何處？此一科學與技術的漫長航程的終站，究竟在何方？

所有這些劇烈變化的高潮，就是行星文明（物理學家稱之為第一型文明）的形成。這可能是歷史上最大的轉變，標誌著向過去所有文明的急遽告別。每一則新聞頭條，都以某種方式反映出行星文明誕生的陣痛。商業、貿易、文化、語言、娛樂、休閒活動，甚至戰爭，都因行星文明的浮現而產生變革。依據行星的輸出能量來計算，我們可以預估將在一百年內達到第一型文明的狀態。除非我們抵擋不住混亂和愚蠢的壓力，否則朝向行星文明的轉變是無可避免的。此一巨大、勢不可擋的歷史與科技力量的最後產物，將會超出任何人的控制。

為何有時預言未能成真？

但是有一些對資訊時代的預言，卻又顯然未能成真。例如，許多未來學家預言「無紙辦公室」將會出現，而電腦將使紙張被廢棄不用。事實剛好相反，只要隨意掃視任何辦公室，都會發現用紙量實際上達到新高。

也有人想像出「無人城市」。未來學家預測，透過網際網路舉行的遠距會議，將使面對面的企業會議變得沒有必要，因而不需每天上班。當人們在家（而非辦公室）工作時，城裡將會被清空，變成鬼鎮。

同樣地，我們將看到「虛擬旅遊」的興起，懶得動的「沙發馬鈴薯」將會成天懶洋洋地倚靠沙發，透過電腦網路漫遊世界，觀賞景色。我們也

將會看到以滑鼠代步的「虛擬逛街客」。購物中心將會破產。而「虛擬學生」將會在線上教室上課，同時卻祕密地玩著電動遊戲並喝著啤酒。大學將因失去吸引力而關門。

我們也可回想一下「影像電話」的命運。一九六四年世界博覽會期間，AT&T公司花了一億美元來改進可與電話系統相連的電視螢幕，讓你與交談的對象互相看見。這個想法沒有引起風潮；AT&T只賣了大約一百套，每套平均成本高達一百萬美元。這個失敗的代價很高。

最後，傳統媒體和娛樂事業的死亡，也被認為迫在眉睫。有些未來學家聲稱，網際網路就是雜技團，會吞噬現場演出的劇場、電影、收音機和電視，所有這些很快地都只能在博物館看到。

事實卻剛好相反。交通阻塞空前嚴重——這是都市生活的永恆場景。蜂擁到異國景點的人群創了新紀錄，觀光事業是地球上最快速成長的工業。血拼客顧不得經濟不景氣，擠滿商店。大學取代虛擬教室的增加，招收比以往為多的學生。當然，有較多的人決定在家工作，或與工作夥伴舉行遠距會議，但都市並未清空。它們反而蔓延出許多衛星城市。今天，透過網路進行視訊會議非常容易，但多數人並不喜歡被攝影，反而偏好面對面的會議。當然，當媒體巨人正在苦思如何在網路上賺取收入之時，網際網路已經改變了整個媒體景觀。但若說到讓電視、收音機和戲劇院消失，則還很遙遠。百老匯的燈光，仍然一如往昔地閃爍著。

穴居人原則

為何這些預測未能實現？我猜想，人們排拒這些進步，主要是基於我的所謂「穴居人原則」（Cave Man Principle）。基因和化石證據都顯示，外觀與我們相似的現代人類，十萬年前出現於非洲，但沒有任何證據顯示，我們的大腦與性格，此後有過較大的改變。如果你找來那時期的一個人，從解剖學上看來，他與你並無兩樣：如果你讓他洗洗澡、刮刮毛，讓他穿上三件式西裝，然後把他擺在華爾街，他的身體與其他人完全沒有區別。所以我們的需要、夢想、性格以及慾望，在過去十萬年間，可能並無很大改變。我們的思考模式，可能與我們的穴居祖先類似。

我的主要的觀點是：當現代科技與我們的原始祖先的慾望衝突時，這些

原始慾望總是獲得勝利。這就是「穴居人原則」。例如，穴居人總是要求「獵殺證明」。光是吹噓被逃走的獵物有多大是不夠的。擁有新鮮動物在手，總比被脫逃的故事受歡迎。同樣地，在我們處理檔案的時候，總希望有列印出的紙本在手邊。人類的本能，似乎並不信任在電腦螢幕上浮動的虛幻電子影像，所以我們即使在非必要時，也會將電子郵件和報告列印出來。這就是無紙辦公室沒有變成現實的原因。

同樣地，我們的祖先總是喜歡可以面對面的場合。這種場合讓我們與他人發生關聯，並讀取隱匿的情緒訊息。這就是「無人城市」沒有應驗的原因。比如，一個主管可能想要仔細評估他的部屬。這件事很難在網路連線時辦好，但在面對面時，主管可以觀察身體語言，以獲得有價值的無意識訊息。由於近身觀察，我們發生了關聯，也能讀取他們微妙的身體語言，去發現他們腦海中正在動什麼念頭。這是因為我們的類猿祖先，在尚未發展出語言前的好幾千年間，幾乎僅僅仰賴身體語言，以傳達思想和感情。

這就是為何「虛擬觀光」沒有起飛的原因。看見印度古蹟泰姬瑪哈陵是一回事，有權利吹噓親眼看見，又是另外一回事。類似的情形也反映在音樂欣賞上，在光碟上聆聽你喜歡的音樂家的感受，與在現場演奏會看到這個音樂家被樂迷包圍、歡呼以及叫嚣，因而熱血奔騰的感受，並不相同。這意味著，即使我們能夠下載我們喜歡的戲劇或名人的影像，但還是無法與親眼看到舞台上的戲劇或歌手的表演相提並論。雖然歌迷可以從網路上免費下載圖片，但他們寧可排很長的隊伍，去獲得本人親筆簽名照或買票看現場表演。

這就是有關「網際網路會淘汰電視和收音機」的預言尚未實現的原因。當電影和收音機剛出現時，人們為現場演出的劇院感到痛惜。當電視來臨時，人們也預期電影和收音機的末路。但我們現在卻仍然生活在一個混合的媒體世界中。我們得到的教訓是，某一個新媒體不會使前面的媒體成為過去式，而是與它共生。但是這些媒體之間的混合和關係卻不斷地改變。任何能夠正確預測未來這些媒體的結合方式的人，將會非常富有。

這樣的演變理由在於，我們的古代祖先總是希望眼見為憑，而非道聽塗說。我們在森林中若要繼續生存，仰賴實際物證而非依靠謠言，乃至關重要。甚至在一個世紀以後，我們仍將會有現場演出的劇院，也會繼續

有追星族，這是遠古以來的傳統。

還有，我們是掠食性動物的子孫。因而，我們喜歡觀看別人，甚至在電視機前一坐就是好幾小時，不斷地觀賞著人類同伴的可笑舉止；但若是感覺到有人在看我們時，則立刻緊張起來。事實上，科學家做過統計，我們只要被陌生人注視四秒鐘，就會覺得不自在。過了十秒鐘，我們就會因為被人注視而生氣，產生敵意。這也就說明了，為什麼原來的影像電話會失敗。還有，誰願意在上網以前先梳理頭髮？（今天，經過數十年的緩慢、痛苦的改進，視訊會議終於開始流行。）

現在我們也可能選修線上課程。但大學裡仍然擠滿學生。與教授一對一的會面，能夠獲得個別的注意，以及個人問題的回答，因而仍然比線上課程受歡迎。當申請工作時，大學學位仍然比線上課程證書有分量。

所以「高科技」（High Tech）和「高接觸」（High Touch）之間的競爭，一直存在。亦即，坐在室內看電視好呢？還是走出去，接觸周邊事物？在這個競爭中，我們希望兩者兼得。所以，在這虛擬空間與虛擬實境的時代，我們仍然有實況演出的劇院、搖滾音樂會、報紙與觀光旅遊。如果有人要給我們一張我們的偶像音樂家的免費照片，或是現場演出的入場券，我們將會毫不猶豫地選擇入場券。

所以，這就是「穴居人原則」：我們最喜歡魚與熊掌兼得，但如果只能選擇其一，我們會追隨洞穴先人，選擇「高接觸」。

但是，這個原則也有一個必然的結果。早在一九六○年代科學家剛剛發明網際網路時，人們普遍相信，它會演化成一個為教育、科學及進步而存在的論壇。另外卻有人唯恐它迅速墮落成為沒有法制的西部大蠻荒，一如今日情況。事實上，這是可以預期的結果。依據「穴居人原則」推論，如果你想要預測未來人類社會的互動，你只要想像我們在十萬年前的社會互動，再乘以十億倍。也就是說，掌握小道消息、社交網絡和娛樂的人會得到獎賞。在古代部落中，謠言對消息的迅速流通（特別是有關領袖和大人物的消息）極其重要。那些局外人往往無法存活下來，並傳遞基因。今天，我們可以在雜貨店結帳區的雜誌架上看到這個功能。架上有整面牆的明星八卦雜誌。另外在追逐明星的文化中也可見到。現在唯一的不同在於，部落八卦的重要性被大眾傳播大大增強，可以在瞬息間環繞地球好幾圈。

社群網站的勃興，在一夜之間將年輕的娃娃臉企業家變成億萬富翁，使許多分析師跌破眼鏡，但它也是這個原則的一個例證。在我們的演化歷史中，那些能夠維持廣大社交網絡的人，可以靠它們取得對生存極其重要的資源、意見和幫助。

最後，娛樂事業將會繼續爆發性的成長。我們有時不喜歡承認，但娛樂事業確實在我們的文化中居於優勢地位。行獵之餘暇，我們的祖先會放鬆並想辦法娛樂自己。這不僅對維繫團結極為重要，也有利於個人建立在部族中的地位。這一點並不意外，因為在動物王國中，舞蹈和歌唱不但是娛樂中的重要部分，也是向異性證明健壯的要素。當雄鳥唱出美妙、婉轉的音調，或進行奇異的求偶儀式時，牠們的目的主要是要向雌鳥證明自己是健康的、體能良好、沒有寄生蟲，並且擁有值得遺傳下去的基因。

另外，藝術的創造不僅是為了愉悅，也對大腦的進化扮演重要的角色，因為，在大腦中大部分的資訊是以符號的形式處理的。

所以，除非我們從基因上根本改變我們的人格，否則我們仍可以預期，未來的娛樂事業、八卦小報以及社交網絡的力量將會增加，而非減少。

科學如利劍

我曾看過一部由莎士比亞名劇《暴風雨》（The Tempest）改編而成的電影，片名是《禁忌的星球》（Forbidden Planet）。這部電影徹底改變了我對未來的態度。在電影中，太空人來到了一個處於興盛時期的古代文明，這個文明比我們先進好幾百萬年。他們達成了科技的終極目標：不須動用工具而有無限能力，也就是透過念力就能做幾乎任何事情。他們的思想與埋藏於星球深層的巨大熱核電力工廠連接，那些工廠會將他們的慾望轉變成為真實。換句話說，他們擁有神力。

我們將會擁有類似的能力，但我們將不需要再等好幾百萬年。我們將只需等待一個世紀，而且即使在今日的科技，我們就可以看到這個未來已經在萌芽。但這部電影也是一個說教故事，因為它擁有的神力，最終還是毀滅了這個文明。

當然，科學是一把雙刃劍；它所製造的問題跟解決的問題一樣多，但每

經一次考驗，問題的層級都會提高。今日世界有兩大對立的趨勢：一個是去創造寬容的、科學的和繁榮的行星文明；而另一個卻是頌揚會導致社會撕裂的混亂與無知。雖然現在宗派主義者、基要主義者（排斥進化學說）以及祖先延續下來的非理性熱情仍然存在，但不同的是，現在我們有核子、化學以及生物武器。

在未來，我們將從自然之舞的被動觀察者，轉變為大自然的編舞者去主導自然，最終並成為自然的保育者。所以，讓我們祈求，我們能以智慧與和平的力量來運用科學之劍，降伏古代流傳下來的野蠻。

現在，讓我們來開始進行一個假設性旅程，如同那些致力使它成真的科學家所告訴我的，去經歷未來一百年的科學創新與發現。未來的電腦、電信、生物科技、人工智能以及奈米科技的神速進展，將會令人目眩神搖。無疑地，它將會徹底改變未來的文明。

第一章　電腦的未來──心靈控制物質

每個人都把自己的視野，當作世界的極限。

──亞瑟‧叔本華（Arthur Schopenhauer）

悲觀的人，不會發現星球的祕密，或航行到未被發現的陸地，或打開人類精神的新天堂。

──海倫‧凱勒（Helen Keller）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

網路眼鏡和隱形眼鏡／無人駕駛汽車／四面牆都是螢幕／軟性電子紙／虛擬世界／不久以後的醫療護理／生活在童話世界裡

世紀中期（二○三○—二○七○）

摩爾定律之終結／真實與虛擬實境的混合／擴增實境：觀光、藝術、購物和戰爭的革命／全能翻譯機／全像技術與3D立體影像

遙遠未來（二○七○—二一○○）

以心役物／讀心術／夢境攝影／讀心術的倫理／我的fMRI掃描／三度儀和可攜式腦部掃描儀／心靈傳動和神力

那是將近二十年前的事了，但我坐在馬克‧維瑟（Mark Weiser）在矽谷的辦公室，靜靜地聽他解說想像中的未來遠景時的情景，至今仍然記憶猶新。他興奮地一邊用手比畫，一邊告訴我，一個改變世界的新革命即將發生。維瑟是科技新貴的一分子，在全錄帕羅奧圖研究中心（Xerox Palo Alto Research Center）工作，這個研究中心正是個人電腦、雷射印

表機和以圖像做界面的視窗類型建構的發源地。但他是一匹脫韁的野馬，一個不守成規、不因循傳統智慧的人，他也是一個狂野的搖滾樂團成員。

彷彿是一輩子之久的事了，那時個人電腦剛剛出現，開始介入人們的生活。人們對於購買巨大又笨重的桌上型電腦，來作計算表分析和一點點文字處理的這回事，還需要再一段時間後才能逐漸接受。網際網路基本上仍然屬於像我這一類科學家的孤立領域，以神祕的語言為科學家們吐出大量的方程式。人們熱烈地爭辯著，這個坐在桌面上冷冷地注視著我們的盒子，會不會導致人類文明非人性化。當時很多知識分子強烈批評並拒絕碰觸電腦，稱它為俗不可耐的工具，連政治評論家威廉‧巴克萊（William F.Buckley）都要因為使用文字處理機而提出辯護。

就在這個爭論的年代，維瑟創造了「無所不在的運算」（ubiquitous computing）這個新辭彙。遠遠超越個人電腦，他預測有朝一日晶片會因為實在太便宜又供應充足，而遍布整個環境——在我們的衣服、傢具、牆上，甚至身上。它們將會與網際網路連結，分享資料，使我們的生活更加愉悅，監控著我們所有的願望。不論我們到哪裡，晶片就會在那裡悄悄地實現我們的欲望。整個環境都是活的。

在當時，維瑟的夢想顯得怪異，甚至荒謬。多數個人電腦仍然昂貴，也大多未與網路相連。只有瘋子，才會想到億萬個細小晶片會有像自來水那麼便宜的一天。

那時我問他，為什麼他如此肯定會有這個革命。他安靜地回答說，電腦的能力正以指數性增長，卻看不到盡頭。他暗示，數字會說話。那不過是個時間問題。可惜，維瑟來不及看到他所預見的革命，就於一九九九年因癌症而撒手人寰。

在維瑟的預言式夢想的背後，有一股驅動力，被稱為摩爾定律（Moore’s Law）。這個經驗法則推動電腦工業五十年以上，如同時鐘一般設定著現代文明的進程。摩爾定律很簡單，就是「電腦的運算力，大約每十八個月就會倍增」。英特爾（Intel）創辦人之一的戈登‧摩爾（Gordon Moore）於一九六一年首先提出這個定律。在這個簡單的定律的推波助瀾下，世界經濟引發了大變革，衍生了龐大的財富，我們的生活也被改變，永不回頭。當你把電腦晶片的下降價格，和它的運算速

度、處理能力與記憶數量的快速擴充畫成圖表時，你會發現過去五十年是一條直線。（這是一條對數曲線，事實上，如果你將圖表繼續向過去延伸，讓它包含真空管科技，甚至機械式手操作的加法機器，這條線還能擴充到過去一百年。）

我們的線性思考，往往難以掌握指數性增長的意義。我們有時完全無法感受漸進式的指數性改變。但經過數十年以後，它卻可以使我們周邊的所有事物完全改觀。

依據摩爾定律，你每年聖誕節得到的新電腦遊戲的威力，比起去年的都會接近倍增（就電晶體的數量而言）。此外，經過數年以後，此種遞增變得意義更加深遠。例如，當你接到郵寄而來的卡片時，它往往有一個會唱「祝你生日快樂」的晶片。令人訝異的是，那個晶片的運算力竟然比一九四五年盟軍所有的電腦總和還要大。連希特勒、邱吉爾或羅斯福，都有可能因為爭奪它而被殺。但我們是怎麼對待它的呢？生日過後，我們將卡片連同晶片一起拋棄。今天，你的手機的運算力，比一九六九年美國國家航空暨太空總署（NASA）送兩個太空人登陸月球時所有的電腦還要強大。電子遊戲所使用的電腦運算力，要比十年前的大型主機還要大，若是模擬3D情境時，所耗費的電腦能力更是巨大。今天索尼公司（Sony）的PS遊戲機（約值三百美元），力量可與一九九七年的軍用超級電腦匹敵，而後者要花費百萬美元。

若我們回到一九四九年，分析人們對電腦的未來的看法時，我們將會發現電腦運算力的線性增長與指數性增長的區別。那一年《大眾機械》（Popular Mechanics）雜誌預測，電腦將會以線性成長，或許未來只會增加二倍或三倍。它說：「今日的計算機如『電子數字積分計算機』（ENIAC）裝有一萬八千個真空管，重達三十噸。未來的電腦也許只有一千個真空管，重量只有一‧五噸。」

（大自然之母很重視指數的力量。單一病毒可以劫持一個人類細胞，強迫它複製千百個自己。只要每一代成長一百倍，經過五代以後，一個病毒就能衍生出一百億個病毒。難怪只要一個病毒，就能感染擁有萬億健康細胞的人體，並且在一週左右就讓你感冒。）

電腦的運算能力，不僅僅在於數量上的增加，且其增加的方式已經產生根本的變化，因而對經濟產生重大影響。每隔十年，我們就能看到此一

層遞式的變化：

☆一九五○年代。真空管電腦是龐大的新奇裝置，在好幾個房間內裝滿叢林般的電線、線圈和鋼架。唯有軍方才買得起這些醜陋的大怪物。

☆一九六○年代。電晶體取代了真空管電腦，而大型主機電腦逐漸進入商業市場。

☆一九七○年代。積體電路板（內含數以百計的電晶體）開創了與大桌子同樣大小的迷你電腦。

☆一九八○年代。晶片（內含數千萬個電晶體）使可以放進公事包的個人電腦成為可能。

☆一九九○年代。網際網路聯結數億台電腦，而成為一套單一的、全球性的電腦網路。

☆二○○○年代。無所不在的運算將晶片從電腦解放，散布於整個環境中。

於是舊的典範被新的典範取代。本來是桌上型或膝上型電腦內的單一晶片與電腦相連，變成了千千萬萬晶片散布在諸如傢具、電器、圖片、牆壁及衣服等人製物品中，它們全都可以互相溝通，並與網際網路相連。

當這些晶片植入某一器具以後，就有了神奇的轉變。打字機被植入晶片以後，變成了文字處理機。電話被植入以後，變成了手機。照相機被植入以後，變成了數位相機。彈珠遊戲機變成了有聲光的電子遊戲機。錄音機變成了iPod。飛機變成了致命的無人駕駛攻擊武器。每當某一工業產生了革命性變化，它也因而脫胎換骨，獲得新生命。最終，幾乎我們周邊所有的事物都會變得聰明。晶片會變得比他們的塑膠包裝還便宜，也會取代條碼。那些不願意讓產品變聰明的公司，將被順應潮流的競爭者淘汰。

當然，我們仍然會被各種顯示器圍繞著，但是它們看起來像是壁紙、相框或家庭合照而不像電腦。想想看今天我們家中裝飾用的圖片和相片。然後再想像它們都活了起來，可以移動，並且與網路相連。當我們走到外面，我們會看到圖像跟著移動，因為移動圖像的價格跟靜態的圖像相

同。

電腦的最終結局，跟其他大量生產技術產物（如電力、紙張以及自來水）一樣，將會變成看不見的東西。也就是說，因被編織在生活中而消失，變得無所不在而又看不見，靜悄悄地、不著痕跡地實現我們的願望。

今天，當我們進入屋內時，我們會自動地尋找電燈開關，因為我們假設牆上裝有電源。在未來，我們進入屋內時會做的第一件事，是尋找網際網路的入口，因為我們會假設房間是有智能的。如同小說家馬克斯‧弗里施（Max Frisch）所說：「科技過於融入世界，以致於感受不到它的存在。」

摩爾定律也容許我們預測電腦在未來短期內的演化。在未來十年，晶片將與超級靈敏的感應器結合，使它們能夠偵測到疾病、意外以及緊急狀況，並且在狀況失控前發出警訊。在某種程度內，它們會認識人的聲音、容貌，並且以正式的語言交談。它們將能創造出我們今日僅能夢想到的完全虛擬世界。大約在二○二○年左右，一個晶片的價格將會降低到一美分，與便條紙同價。於是我們會有億萬個晶片遍布周遭，悄悄地執行著我們的指令。

最終，電腦二字，將會從日常語言中消失。

為了探討科學和技術的未來進展，我將每一章分成三個時期：世紀初期（現在—二○三○）、世紀中期（二○三○—二○七○）、最後是遙遠未來（二○七○—二一○○）。這些時期只是粗略的劃分，但可以顯示出本書內各種趨勢輪廓的時間架構。

到了二一○○年，電腦迅速增加的運算力，將會為我們帶來如同我們曾經崇拜的神話中諸神的力量，使我們有能力純以思想就能控制周圍的世界。如同神話中的諸神，能在一次簡單的揮手或點頭之間，就能移動物體並改造生命。我們也將能以念力控制周圍的世界。我們將可與散布在環境中的晶片，隨時進行心智接觸，讓它們靜靜地執行我們的指令。

我記得曾在《星艦迷航記》中看到一個小插曲。星艦「企業號」（Enterprise）的航員曾經通過希臘諸神居住的星球。阿波羅（Apollo）如同巨塔般站立面前，使他們目眩神搖。阿波羅只要稍用神力，就可以

摧毀他們。二十三世紀的科學，面對數千年前支配天庭的希臘諸神，竟然顯得軟弱無力。但是，一旦航員從遭遇希臘諸神的衝擊回過神來，他們會很快地認識到，神力必有其來源，而阿波羅一定是以心智與中央電腦及電力工廠連接，讓它們去實現願望。在航員找到並摧毀力量的來源之後，阿波羅被降為凡人。

這不過是一個好萊塢故事。不過，如果以現在實驗室中最先進的發現來推斷，科學家可以預期，終有一天我們也可以運用心電感應來控制電腦，擁有像阿波羅一般的力量。

世紀初期（現在—二○三○）

網路眼鏡和隱形眼鏡

今天，我們可以用電腦和手機與網際網路溝通，但在未來，網際網路將會無所不在——在牆面的螢幕、傢具、廣告板、甚至在我們的眼鏡和隱形眼鏡裡。只要一眨眼，我們就已上網。

我們可以用數種方式將網路置於鏡片上。影像可以直接從眼鏡送出，透過水晶體到達視網膜。影像也可以把水晶體當成螢幕直接投射。或者可以將小珠寶似的鏡頭附在鏡框上。當我們往眼鏡中看去，我們會像看電影螢幕一般看到網際網路。於是我們就能以手持的器具，透過無線連結去操控電腦。由於電腦認得出手指揮動時的位置，所以也可以僅僅在空中比畫手指來控制影像。

例如，自一九九一年以來，華盛頓大學致力改進虛擬視網膜顯示（virtual retinal display,VRD）。這種顯示方式，是將紅、綠、藍色的雷射光直接對著視網膜閃動。VRD的視角為一百二十度，解析度為1600×1200像素，能製造與電影院同樣鮮明、生動的影像。它的影像可以透過頭盔、護目鏡或眼鏡產生。

早在一九九○年代，我曾有機會試戴這些網路眼鏡。那是麻省理工學院媒體實驗室所製造的早期版本。它看起來像是一副普通的眼鏡，不同的是，有一個約半英吋長的圓筒狀鏡片，附著在眼鏡鏡片右邊的角落。我可以毫無困難地看穿鏡片。但是如果我輕拍眼鏡，這個小鏡片就會掉到我的眼睛前面。往鏡片內看過去，我可以成功地看到一個完整的電腦螢

幕，但似乎比標準的個人電腦螢幕稍小。我對它的清晰程度非常訝異，彷彿螢幕正盯著我的臉。然後我又拿到一個器具，約有一個手機的大小，上面有一些按鍵。只要按動按鍵，我就可以控制螢幕中的游標，甚至打出指令。

在二○一○年，為了我所主持的「科學頻道」特別節目，我旅行到喬治亞州的本寧堡（Fort Benning）去驗證美國陸軍最新的被稱為「陸地勇士」的「戰場網際網路」。我套上一個特別的鋼盔，旁邊附加著一個迷你型的螢幕。當我將螢幕翻轉到眼前時，突然看見了令人訝異的景象：一個以x記號標示友軍與敵軍的整個戰場。令人印象深刻的是，所謂「戰爭的迷霧」被移開了，全球定位系統（Global Positioning System,GPS）的感應器可以正確地標示出所有軍隊、坦克和建築物的位置。只要按下一個按鈕，影像就會迅速改變，戰場不見了，代之以氣象資訊、友軍和敵軍的部署、戰略與戰術。

有一個更加先進的版本，會先將晶片和LCD植入塑膠鏡片，讓網際網路直接閃現在隱形鏡片上。在西雅圖的華盛頓大學的巴巴克‧帕維茲（Babak A.Paviz）和他的團隊，已經在進行網路隱形眼鏡的基礎工作，並設計出產品原型，以期日後可以改變我們進入網際網路的方式。

他已經預見到，此一技術可以立即用來幫助糖尿病人掌控他們的血糖指數。此一鏡片將可以即時顯示體內的狀況。但這只是開始。帕維茲預期，我們終將可以下載任何電影、歌曲、網站或網際網路裡的資訊片段，進入隱形眼鏡。當我們悠閒地享受著完整影片時，鏡片中將會有一個完整的家庭娛樂系統。我們也可以通過這個鏡片，直接用這個系統連接到辦公室的電腦，然後操作在眼前閃現的檔案。當我們舒適地在海濱渡假時，也可以在一眨眼之間，就能與辦公室進行遠距會議。

如果把某些辨識軟體置入網路眼鏡，它們將可辨識物體甚至人臉。現在已有一些軟體程式可以辨識預先儲存的臉部圖像，正確度達百分之九十以上。當你說話的時候，不僅僅是對談者的名字，連他的簡歷也都會閃現面前。在集會中，偶然遇見某個認識的朋友，卻一時想不起名字的尷尬場面就可以避免。這種功能在雞尾酒會中也可發揮重要的作用。在很多陌生人中，某些人非常重要，但你不知道他們是誰。未來，即使在你跟陌生人談話時，也能立刻知道他們是誰，並了解他們的背景。這有點像《魔鬼終結者》（The Terminator）中的機器人所見的世界。

此一發展也會改變教育系統。未來，參加期末考的學生，將能透過隱形眼鏡，在網際網路中搜尋答案。這對於依賴記誦教學的老師來說，顯然是個問題。因而，老師們必須把教學重點改放在思考與推理能力的培養。

你的眼鏡框架若裝上錄影機，也可以錄下周邊影像，然後直接傳送至網際網路。全世界的人都可能同步分享你的經驗。不管你在看什麼，其他千萬人也都看得到。父母將會知道孩子在做些什麼。愛人在分別以後還可以繼續分享經驗。出席音樂會的人，可以與全世界的樂迷溝通內心的感動。檢查員可以訪問遠方工廠，將現場影像直接傳播到老闆的隱形眼鏡上。或是夫妻中一個人到店裡採購，而另一人則提供採買意見。

帕威茲已經能夠將電腦晶片縮小，將它放進隱形眼鏡的聚合物薄層中。他也已經成功地將一個發光二極體（LED）放入隱形眼鏡，而他目前正在測試一個8×8陣列的LED。他的隱形眼鏡能作無線遙控，他聲稱，「那些零件最終將包含數百個LED，可以在眼前形成影像，如文字、圖表和照片。多數硬體都是半透明的，所以穿戴的人可以在生活環境中遊走，而不致碰到東西或迷失方向。」他的最終目標，是創造出三千六百像素的隱形眼鏡，每一像素不超過十微米厚。這個目標，仍需好幾年才能達到。

網際網路隱形眼鏡的優勢之一，就是使用的電力極小（只需幾個百萬分之一瓦），所以能源需求極為經濟，不易耗盡電池。另一優勢是，眼睛和視覺神經，從某些方面來說，是人類大腦的直接延伸，所以我們無需再行植入電極就能和大腦接觸。眼睛和視覺神經以超過高速網路的速度傳遞訊息。所以，一個網際網路隱形眼鏡可能提供最快、最有效率的大腦通路。

透過隱形眼鏡將影像投射進入眼睛，比起透過網路眼鏡略為複雜。一個LED可以製造一個光點（或像素），但是你必須增加一個微鏡頭才能聚焦至視網膜。最後的影像將會浮現在眼前兩呎外。帕維茲正在考慮一種較先進的設計，使用微雷射將特別明晰的影像直接送至視網膜。我們也能使用與晶片工業蝕刻微細電晶體的相同技術，蝕刻出同樣微細的雷射機，成為世界上最小的雷射裝置。使用這種技術，基本上有可能製造出大約一百個原子寬的雷射機。如同電晶體，我們有可能將數百萬個雷射機裝入指甲大小的晶片中。

無人駕駛汽車

在不久的將來，你將能一邊開車，一邊安全地經由隱形眼鏡在網路上漫遊。上班的路不再是令人煩心的事，因為汽車會自動駕駛。現在的無人駕駛汽車，已經可以用GPS精確定位（誤差在數英尺內），行進數百英里。五角大廈的「國防先進研究計畫署」（DARPA）所支持的「DARPA大挑戰」，邀請國內實驗室提交無人駕駛汽車，參加橫渡莫哈威沙漠比賽，獎金一百萬美元。DARPA一向持續其傳統，以經費支持危險但有遠見的科技。

五角大廈支持的計畫很多，其中就有網際網路和GPS系統。網際網路原本是為了在戰爭中和戰後，讓科學家與官員互相聯繫，而GPS原來是為引導ICBM飛彈而設計。但這兩者在冷戰結束後解密，交給了公眾。

二○○四年，此一競賽有一個令人尷尬的開始。參賽的無人駕駛汽車，竟然沒有一輛可以在遊歷一百五十英里的崎嶇地形後通過終線。這些機器人汽車不是故障了就是迷路了。但是到了次年，五輛汽車通過了更加嚴苛的考驗。它們要走的路，包含一百個急轉彎、三個狹窄的隧道和兩側都是懸崖的小路。

某些批評家說，機器人汽車或許能通過沙漠，卻無法在市區行進。所以，在二○○七年，DARPA又支持了一個更具雄心的「城市挑戰」計畫，參加的汽車必需在六小時內，通過仿建的市區，完成累人的六十英里路。一路上，汽車必需遵守所有的交通規則，避開其他機器人汽車，並且互相協調通過平交道。結果有六隊成功地完成「城市挑戰」，前三名分別獲頒二百萬、一百萬和五十萬美元的獎金。

五角大廈的目標是：在二○一五年之前使三分之一的地面部隊自動化。這將被證明是一種救命的科技，因為最近多數美軍的意外事故都是來自路邊炸彈。未來，許多美軍車輛都將不需駕駛員。而對於一般消費者來說，那意味著只要按下開關，汽車就會自己行進，駕駛員可以工作、放鬆、欣賞風景、看電影或上網。

為了製作「Discovery頻道」的電視特別節目，我曾有機會駕駛一輛這樣的汽車。那是一輛光鮮的跑車，經過北卡羅來納大學工程師改裝，它變為完全自動化。它的電腦運算力相當於八部個人電腦。對我而言，要進

入車中有點困難，因為內部已經被塞滿了。在車內各處，都可以看到複雜巧妙的電子零件堆疊在座位和儀表板等處。當我抓住駕駛盤時，我發現它是以橡皮纜線與一個小馬達相連。透過控制馬達，電腦可以轉動駕駛盤。

我轉動鑰匙，踏上加速板，把車子開到公路上以後，輕拍一個開關，讓電腦取得控制。我將手從駕駛盤放開，於是車子自己前進了。我對這輛車子有完全的信心，它的電腦經常透過駕駛盤上的橡皮纜線進行微調。剛開始時，看到駕駛盤和加速踏板自己在動，感覺有點詭異。彷彿那裡有個像幽靈般的隱形駕駛人在控制著，但過了一會兒，我習慣了。事實上，因為可以在一輛能夠自動以超人的精確和技術駕駛的汽車上放鬆，沒多久就變成了樂事。我已經可以放鬆地向後靠坐，享受搭乘的樂趣。

無人駕駛汽車的心臟是GPS，它讓電腦知道自己的位置，誤差只有數英尺。工程師對我說，GPS系統對汽車位置的斷定，誤差可以降至數英吋。GPS系統本身是一種神奇的現代科技。環繞地球軌道運行的三十二顆GPS衛星，不斷地散發無線電波，我車子上的GPS接收器可以收到這些電波。每一個衛星的訊號都會因為通過不同軌道而略為變形。這種變形被稱為「都卜勒頻移」（Doppler shift）。例如，如果衛星向你移動無線電波會壓縮，遠離你時會伸展。分析三至四個衛星的頻率的細微變形以後，汽車的電腦可以正確地斷定我的位置。

這輛汽車的擋泥板上也有雷達可以察覺障礙。這一點在未來至關重要，因為一旦偵測到即將發生的意外，每一輛汽車都應自動做緊急處置。現在，美國每年有將近四萬人死於車禍。未來，「車禍」一詞，將會逐漸消失。

塞車也可能成為過去式。一個中央電腦透過與每一輛無人駕駛汽車的通訊，可以追蹤路上所有的車子的移動。如此將很容易找出公路上的塞車地點和瓶頸。在聖地牙哥以北的十五號州際公路上，有一個實驗性措施。晶片置於路面，使得中央電腦可以掌控路上的汽車。當交通阻塞發生時，電腦的控制權將超越駕駛員，以便使交通恢復暢通。

未來的汽車還能察覺其他的危險。當駕駛人睡著時（特別是在夜間或長途、單調乏味的路上），已有成千上萬的人因此在車禍中死亡或受傷。未來的電腦可以聚焦於你的眼睛，分辨出你是否昏昏欲睡。電腦會以程

式發出聲響，把你叫醒。如果叫不醒，電腦會接管汽車。電腦也可以辨認出汽車中過量出現的酒精，使每年因酒後駕車而發生的大量傷亡得以減少。

汽車轉變為智慧汽車的事將不會立即發生。軍隊會率先部署最新設計出來的車種。然後無人駕駛汽車才會進入市場，且首先出現在長程而又乏味的州際公路。然後它們才會出現在郊區和大城市，但駕駛人在緊急時將隨時可以否決電腦。最終，我們將會懷疑，如果沒有它們，日子該怎麼過。

四面牆都是螢幕

電腦不僅僅能解除交通負荷和降低汽車事故，它們也能幫我們與朋友及認識的人連結在一起。過去，曾有人抱怨說，電腦革命降低了人性也孤立了人們。事實上，它使我們的朋友圈和認識的人呈現指數性增長。當你孤獨或需要同伴時，你只需要求牆壁上的螢幕，為你與世界上其他寂寞的個人設定一個橋牌牌局。當你需要某些助理為你計畫一次休假、設計一趟旅行或找一個約會時，你將會透過牆面螢幕去執行。

未來，一個友善的臉（可以隨時更新，以配合你的品味），將會首先浮現在螢幕上。你可以要求它計畫一次休假。它知道你的偏好，會在網路搜尋出一份清單，並為你列出價格最合理的最佳選擇。

家庭聚會也可能透過牆面螢幕進行。你的起居室的四面牆，將會有落地螢幕，因而你會被遠方親戚的影像環繞。未來，也許某一親戚無法出席許某個重要場合。取而代之的是，家庭成員聚集在螢幕旁邊，一起慶祝部分真實、部分虛擬的重聚。或者，透過你的隱形眼鏡，你可以看到所有你喜歡的人的影像，即使他們遠在數千英里之外，也是跟真的一樣。（某些評論者曾說，網際網路原來被五角大廈構想成「男性」。因為它關心的是在戰時維持對敵軍的優勢。但現在網際網路大部分被想像成「女性」，因為它願意傾聽，並且能令他人感動。）

遠距會議將被遠距出席（telepresence）取代——與會者以完全的3D影像與音響出現在你的眼鏡或隱形鏡片中。例如，在會議中，每個人都將圍著桌子坐下，例外的是有些與會者僅僅出現在你的鏡片中。若無鏡片，你會發現環繞桌子的某些椅子是空的。有了鏡片，你看到每個人都坐在

椅子上的影像，好像他們就在那兒。（這意味著所有的與會人員，都將圍坐在類似的桌子邊，由特殊的攝影機錄影，然後把影像送到網際網路。）

在《星際大戰》的電影中，觀眾驚奇地看到3D影像出現在空中。但使用電腦科技後，未來我們將可以用隱形鏡片、眼鏡或牆面螢幕看到3D影像。

剛開始，對著空房間談話也許有點奇怪。但請記得，當電話剛出現時，也有人批評它，說人們要與脫離肉體的聲音對話。他們抱怨電話將會逐漸取代人與人之間的面對面接觸。批評者說對了，但現在我們已經不在乎對著脫離肉體的聲音說話，因為它已經大大地擴充了我們的接觸面，也豐富了我們的生活。

這也會改變你的愛情生活。如果你寂寞，你的牆面螢幕會知道你過去的偏好，以及你想要約會的對象的體態與社會性格，然後上網搜尋媒合可能的對象。由於人們為了安全理由，有時會在他們的基本資料中撒謊，你的螢幕會自動搜尋每個人的歷史，以偵測出他們傳記資料中不真實的部分。

軟性電子紙

平面螢幕電視的價格曾經高達一萬美元，十年內降低五十倍。未來，覆蓋整片牆的螢幕的價格也會急遽下降。這些使用有機發光二極體（organic light-emitting diodes,OLEDs）的牆面螢幕，將會柔軟又超薄。除了因為使用可以排列成聚合物的有機化合物，顯得有彈性，他們與一般的發光二極體相似。在柔軟的螢幕中的每一像素，都與一個控制了光的顏色和強度的電晶體相連。

亞利桑那大學軟性螢幕中心的科學家，已經與惠普公司及美國陸軍合作，繼續精進此一技術。日後市場的力量會把此種技術的成本拉下來，提供給大眾。價格下降後，牆面螢幕的價格最終會接近平常的壁紙。所以，人們未來在貼壁紙的時候，也可能同時把牆面螢幕貼上。當我們希望改變壁紙的類型時，我們只需按一個按扭。重新裝潢就是這麼簡單。

這個軟性螢幕科技，也會使我們與可攜式電腦的互動徹底改變。我們將

不需用力搬運隨身的沉重電腦。膝上型電腦可能只是一片OLED，我們會將它折疊起來，放進皮夾。手機內可能含有一個軟性螢幕，可以像捲軸一般拉出來。然後，你不需在小鍵盤上彆扭地打字，而可以拉出一個你所需要的軟性大螢幕。

此一科技也可能使個人電腦螢幕變成透明。在最近的將來，我們可能從一個窗子外望，然後揮揮手，窗子突然變為個人電腦。或者出現任何我們所要的影像。我們可以從數千英里之遙的窗子向外眺望。

今天，我們有小紙片可以打草稿，然後丟掉。未來，我們會有沒名字的「小片電腦」，我們在上面打草稿，然後丟棄。今天電腦是我們辦公室的重心，我們把它安放在桌子和傢具的旁邊。未來，桌上型電腦將會消失，而檔案將會跟隨著我們，從一個地方到另一個地方，從一個房間到另一個房間，或者從辦公室到家裡。這將給我們無縫隙的資訊，任何時間，任何地點。今天，你會在機場看到千百個旅客帶著可攜式電腦。到了旅館，必須和網際網路相連。一旦回到家，他們必須將檔案下載到桌上型電腦。未來，你將不再需要提著電腦到處走，因為不論任何轉角、牆壁、圖畫與傢具，都能幫你連上網路，即使你在火車或汽車上也一樣。（「雲端運算」是一個早期的應用實例。你所要付出的，不是電腦使用費，而是使用時間。電腦運算的計量，就跟自來水表或電表一樣。）

虛擬世界

「無所不在的運算」的目標，是要把電腦帶進我們的世界：晶片隨處有。而虛擬實境的目標剛好相反：它是把我們放進電腦的世界。美國軍方於一九六○年代首先用模擬的方式將虛擬實境引進飛行員和士兵訓練。飛行員可以透過觀看電腦螢幕和移動控制桿，練習在航空母艦的甲板上降落。如果發生了核子戰爭，將軍們和政治領袖們，可以隔著遙遠的空間在虛擬世界祕密開會。

今天，由於電腦的運算力呈指數性增長，人們可以生活在模擬的世界中。在其中，你能控制一個化身（一個代表你的動畫影像），也能與其他的化身會面，探索想像世界，甚至墜入情網，並且結婚。你也能夠以虛擬貨幣購買虛擬物品，然後又將虛擬物品兌換真正的錢幣。到二○○

九年為止，最著名的網站之一「第二生命」（Second Life）有一千六百萬人註冊。那年，有一些人靠「第二生命」每年賺了一百萬美元以上。（不過，你所賺的利益將被視同真正的收入，美國政府要課稅。）

虛擬實境已是電子遊戲的主體。未來，在電腦運算力繼續擴充過程中，你將可以造訪並非真實的世界。例如，如果你想去購物或訪問一個奇異的地方，你會先進入虛擬實境，在電腦螢幕中漫遊，如同真的到了那兒。就這樣，你可以在月球漫步，在火星上渡假，在遠方的國度購物，參觀任何博物館，並且自己決定要往哪兒走。

在某種程度上，你也有能力在虛擬世界中感受碰觸物體的可能。所謂「觸覺科技」（haptic technology）可以讓你感受由電腦生成的物體的出現。這種技術，當初是由必須用遙控機器人手臂控制高度輻射物體的科學家，和希望能讓飛行員在模擬飛行中感受到控制桿阻力的軍方所研發。

為了複製觸覺，科學家製造了一個儀器，附加在發條和齒輪上，因此當你以手指向前推動此一儀器具時，他會倒推回來，模擬了壓力的感覺。例如，你將手指移動通過一張桌子時，這個儀器可以模擬出堅硬木質平面的感覺。用這種方式，你可以感覺到在虛擬實境眼鏡中出現的物體，將會完成你身處異地的幻覺。

為了創造質感，另一個儀器讓你的手指通過一個包含數千細針的表面。當你的手指移動時，每一細針的高度由電腦控制，所以它能模擬堅硬表面、柔軟衣服、或粗糙的沙紙的質地。未來，經由穿戴特殊手套，有可能在接觸各種不同的物體和表面以後，給予真實的感覺。

這種科技對未來外科醫生的訓練非常重要，因為外科醫生在進行精密的手術練習時，病人可能只是一個3D全像圖，所以必須能夠感受壓力才行。它也使我們稍稍接近了《星艦迷航記》系列中的全像甲板（holodeck），在那裡你漫遊於一個虛擬世界，也可碰觸虛擬物體。當你逛過一個空房時，你可以在護目鏡或隱形眼鏡中看到很棒的物體。當你伸手去抓時，一個觸覺儀器由地面升起，模擬了你所碰觸的物體。

我在製作「科學頻道」的節目時，曾有機會訪問新澤西州羅灣大學（Rowan University）的「洞穴自動虛擬環境」（cave automatic virtual environment,CAVE）。我進入一個空房間，被四面牆包圍，每一面牆都

由投影機照亮。3D影像可以投射到牆上，使人產生移動到另一個世界的錯覺。在一次示範表演中，我被巨大、兇猛的恐龍所包圍。透過搖動控制桿，我可以騎到暴龍的背上，甚至進入牠的口中。其後，我又訪問了在馬里蘭州的阿伯丁試驗基地（Aberdeen Proving Gound），在那裡美國軍方設計了最先進的全像甲板，我的頭盔和背包上裝了感應器，讓電腦知道我身體的正確位置。然後我走上一部全方位跑步機（Omnidirectional Treadmill），這是一部精緻的跑步機，容許你走向任何方向，而身體仍在原處。突然之間，我發現我已身處戰場，不斷閃躲敵人狙擊手的子彈。我可以向任何方向逃跑，躲在任何小巷，在街道中奔跑，而牆面的3D螢幕也在瞬間改變。我甚至可以平躺在地板上，螢幕也隨之改變。我可以想像，未來你可以體驗到完全的臨場感，諸如參與對抗外星人太空船的格鬥、逃離暴烈的怪物或嬉戲於荒島，而這些都會發生於你舒適的起居空間裡。

不久以後的醫療護理

看醫生的過程將會徹底改變。做例行性的檢查時，跟你談話的「醫生」，可能是出現在你牆面螢幕的一套軟體，它可以正確地診斷出你百分之九十五的普通小病痛。你的「醫生」可能看來像一個人，但事實上那只是一個被程式設定來問某些簡單問題的活動影像。你的「醫生」也會有你的完整基因記錄，在綜合考慮過所有的基因危險後，會建議你進行一個醫治療程。

在診斷一個問題時，這個「醫生」會要求你做一些身體的檢驗。在《星艦迷航記》原來的電視影集系列中，當觀眾面對一個被稱為「三度儀」的儀器，看到它能夠立即診斷出任何疾病，並透視身體時，都非常驚奇。但你並不需要等到二十三世紀才會有這種未來的儀器。重達數噸，要占據整個房間的磁振造影機（MRI），已經被微型化成為大約一英尺大，最終將會與手機一樣大。當機器掃描過你的身體時，你可以看到自己器官的內部。電腦會處理這些3D影像，然後為你做出診斷。這種檢驗也能在數分鐘內推斷出多種不同的疾病，包括在腫瘤形成前數年的癌症。這種檢驗會包含DNA晶片，這是一種有數百萬細小感測元件的矽晶片，能夠偵測出許多疾病的DNA源頭。

當然，很多人不喜歡看醫生。但在未來，你的健康，將在不知不覺間，

每天悄悄地且不費力地被監看數次。你的抽水馬桶、浴室鏡子和衣服上都會有DNA晶片，可以靜靜地斷定你的身體中有無少量（約數百個）癌細胞的聚集。你的浴室和衣服中的感應器，也會比現代醫院或大學所裝設的更多。例如，只要對著鏡子吹一口氣，就能偵測出一種突變的p53蛋白質——它的出現，暗示著百分之五十的癌症罹患率。這也意味著「腫瘤」一詞，將會在語言世界中逐漸消失。

今天，如果你在荒郊的路上發生嚴重車禍，很可能流血致死。未來，你的衣服和汽車在第一個創傷出現時將會立刻採取行動，打電話招來救護車，告知失事的方位；並在你失去意識期間，將你的整個病歷上傳到醫院。未來，孤單地去世將很不容易。你的衣服能夠透過編織在布料中的晶片，察覺你的心跳、呼吸，甚至腦波是否正常。當你穿上衣服時，就已經上網。

今天，我們已經可以將一個帶有電視攝影機和無線電的晶片，放入如阿斯匹林大小的藥丸中。將它吞下以後，這個「聰明藥丸」（smart pill）就會攝下食道與小腸的影像，然後將訊號傳送至附近的接收器。英特爾的宣傳口號「內有英特爾晶片」（Intel inside），因而有了新的意義。如此，醫生不必進行大腸鏡檢查（必須將六英尺長的管子，勉強地塞入大腸），就能獲得病人腸道的影像，診斷出癌症。像這樣的微小儀器，將會逐漸降低切割肌膚動手術的必要。

這只是電腦革命會如何影響健康的例子之一。我們將在第三章和第四章，討論醫療革命的更多細節，也會談到基因治療、複製技術以及人類壽命的改變。

生活在童話世界裡

由於電腦的智能將很便宜並且遍布整個環境，某些未來學家評論說，未來的世界看起來將會跟童話世界一樣。如果我們擁有神的力量，那麼我們所居住的天堂將如同一個奇幻世界。例如，未來的網際網路，就會變成白雪公主的故事中的魔鏡。我們會說「魔鏡、牆上的魔鏡」，然後一個友善的臉孔會出現，允許我們接觸行星的智慧。我們會在玩具上放置晶片，使它們聰明，如同想要變成真正男孩的小木偶皮諾丘（Pinocchio）。就像《風中奇緣》中的印第安公主寶嘉康蒂

（Pocahontas），我們將能對著風和樹說話，而他們也會回答。我們將會理所當然地認為物體是有智能的，可以對他們說話。

由於電腦將能找到許多控制老化過程的基因，我們將會跟彼得潘（Peter Pan）一樣，永遠年輕。我們將可以使老化過程減緩，也許還能將它逆轉，就像來自夢幻島的男孩彼得潘不想長大一樣。擴增實境（augmented reality）將會帶來跟灰姑娘一樣的幻境，我們可駕著四輪大馬車，駛向夢幻舞會，然後優雅地與英俊的王子共舞。（但是到了午夜，擴增實境眼鏡關閉以後，我們又回到現時世界。）由於電腦正在揭露控制身體的基因，我們將可控制、並再造我們的身體，如同《美女與野獸》（Beauty and the Beast）中的野獸一般。

某些未來學家甚至擔心如此一來，我們將會回到神祕的中世紀——那時候，人們相信周邊到處都有看不見的精靈。

世紀中期（二○三○–二○七○）

摩爾定律之終結

我們必須問：這個電腦革命會持續多久？如果摩爾定律繼續維持五十年，我們可以想像得到，電腦的運算速度會遠遠超過人腦。到了世紀中期，一種新的動力會發生。如同喬治‧哈里森（George Harrison）曾經說過：「所有的事情都會成為過去。」即使是摩爾定律也有終止的時候，那時電腦興起的令人歎為觀止的力量，又已推動經濟成長半世紀了。

今天，我們將電腦產品力量的不斷增加和功能的複雜化，視為理所當然，事實上也相信那是我們與生俱來的權利。我們之所以要年年購買新的電腦產品，就是因為知道新推出的類型，運算力幾乎都會倍增。不過一旦摩爾定律崩塌了，而每一代新推出的電腦產品與前一代的能力和速度都不相上下，那麼我們幹嘛還要再買新的電腦？

由於各式各樣的產品中都有晶片，這一點可能對整個經濟造成災難性的效果。當整個工業停止運轉，千百萬人會失去工作，經濟可能陷入混亂。

多年前，當我們物理學家指出，摩爾定律無可避免的崩塌時，工業界總

是嗤之以鼻，暗示我們只是喊著「狼來了」。他們說，摩爾定律的終結，已經被預測太多次了，所以根本就不相信。

但是，不會再這樣下去了。

兩年前，我前往華盛頓州西雅圖微軟總部所主辦的一個重要會議，擔任主講人。微軟的三千個頂尖工程師也在聽眾之中，等著聽我說出電腦與電訊的未來。一眼望去，我可以看到許多年輕工程師熱切的臉孔。他們將要創造出許多程式來讓桌上型和手提電腦應用。我對摩爾定律直言不諱，告訴大家，電腦工業必須為此一崩塌做準備。如果是在十年前，我會面對的是嘲笑，或者一些竊笑。但這一次我只看到人們都在點頭。

所以，摩爾定律的崩塌，是一件全球性大事，涉及數以兆計的風險。但若要精確地說出它會如何結束，以及何者會取代它，卻完全取決於物理原理。這些物理問題的答案，終將動搖資本主義的經濟結構。

若要了解這個情況，首先就是要了解，電腦革命的非凡成就，取決於幾個物理原理。

第一，電腦之所以有高超的速度，是因為電子訊號以接近光速（宇宙中的終極速度）傳遞。在一秒鐘內，一束光線可以環繞地球七圈，或者到達月球。電子很容易在原子周圍移動，並鬆散地與它結合（透過梳頭髮、走過地毯或折疊衣物，就會脫落——這就是靜電吸附現象）。這些鬆散地結合的電子和它們極快的速率，容許我們以極高速度送出電子訊號，而這種速度造就了過去一世紀的電子革命。

第二，在雷射光束中，能放入的資訊數量幾乎沒有上限。光波震動速度遠快於聲波，可以攜帶的資訊量也遠大於聲音。（比如，想像將一條長繩子拉緊，然後快速振動其中一端。你擺動越快，能沿著繩子傳送的訊號也越多。因此，只要加速振動——亦即增加頻率，能夠放進繩子的資訊數量就會增加。）光是一種波動，每秒震動大約10^{14}。所以，一條光纖電纜每一波動循環就能帶著10^{11}位元的資訊。若是把很多訊號塞進單一光纖，然後又將很多條光纖結合成一條電纜，傳送的位元數量就可以大大增加。這意味著，透過增加一條纜線內的頻道，我們可以傳遞幾乎無限量的資訊。

第三，也是最重要的一點，電腦革命是由電晶體的縮小所帶動。如果將

電路比喻為自來水管道，則電晶體就像是控制水流的閥門。同樣地，只要一個轉動水閥的簡單動作，就能控制大量的水流。電晶體容許小量電流去控制遠大於它的電流，因而擴增了它的力量。

這個革命的核心就是電腦晶片。在指甲般大小的矽晶圓上，就可以包含數億個電晶體。在你的手提電腦裡面，有一個晶片，其中的電晶體只能在顯微鏡下才看得到。這種難以置信的細小電晶體的製作方法，和T恤的製作相同。

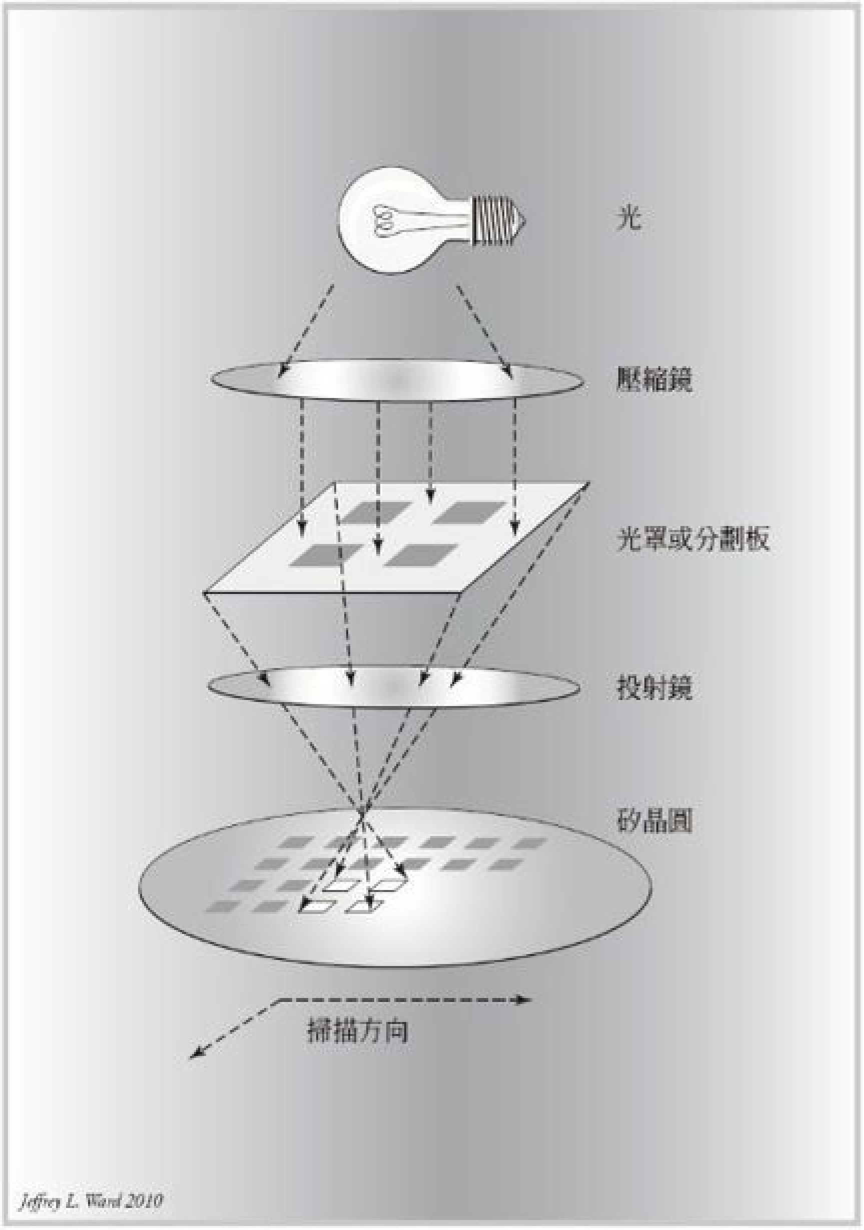
大量製造T恤的第一步，要先按照個人想像的圖樣外型模式創造一個印刷模板。然後將模板放在衣服上，開始噴上顏料。唯有模板上有裂口的地方，顏料才能穿透到衣服上。一旦模板移開，此一模式就已完美地複製於衣服上。

同樣的方式，可以做出一個含有數百萬錯綜複雜的電晶體輪廓的模板。把這個模板放在矽晶圓（含有好幾層對光線很敏感的矽）上。然後將紫外線聚焦於模板，穿透模板的間隙，讓矽晶圓曝光。

然後矽晶圓用酸清洗，蝕刻出電路的外型，並創造出數百萬電晶體的複雜設計。由於晶圓含有許多導體和半導體層，光線蝕刻的深度有深有淺，類型也有不同，所以我們可以製造出極度複雜的電路。

摩爾定律之所以能不斷地增加晶片的力量，原因之一就是因為紫外線可以被調整，使波長越來越短，可能在矽晶圓上蝕刻出越來越小的電晶體。由於紫外線的波長最短可達十奈米（一奈米等於十億分之一公尺），這也意味著能蝕刻出來的最小的電晶體，大約有三十個原子的寬度。

但是，這個過程無法永遠持續下去。到了某一點，物理上就不可能再用這個方法，蝕刻出只有數個原子大小的電晶體。你可以大致推算出何時摩爾定律將會崩塌：那就是當電晶體終於接近單一原子大小的時候。



圖說：摩爾定律之終結。晶體的製造與T恤的設計方式相同。但不是將顏料噴在模板上，而是以紫外線聚焦於模板，將一個圖像燒在矽晶圓的各層。然後用酸蝕刻出圖像，創造出億萬個電晶體。但這種製造程序，在我們遇到以原子為尺度來度量時，就遇到了極限。矽谷是否將因此衰敗？

大約在二○二○年，或者更早，摩爾定律將會逐漸失效。除非發現替代科技，否則矽谷會慢慢轉變成衰敗的工業區。

依據物理定律，矽晶時代終將結束，進入後矽晶時代。電晶體將因體積

太小而必須由量子理論或原子物理學接管，而電子則溢出了管線。例如，電腦內最薄的一層，將會只有五個原子的厚度。依據物理定律，量子理論就在那一點開始接管。德國物理學家提出的海森堡不確定性原理（Heisenberg uncertainty principle）說，你無法同時知道任何粒子的位置和動量。這似乎有點違反我們的直覺，但在原子的層次，你就是無法知道電子在哪裡，所以它無法被準確地限定在一條超薄的線或一層表面上，它一定會溢出，造成電路的短路。

我們將在第四章分析奈米科技時，討論到這一點的細節。本章的其餘部分，我們將假設物理學家已經找到矽晶力量的繼承者。電腦很可能繼續以指數成長，但運算力加倍的時間將不再是十八個月，而是很多年。

真實與虛擬實境的混合

到了世紀中期，我們都會居住在真實與虛擬實境混合的世界中。在我們的眼鏡或隱形眼鏡裡，會同時看到虛擬的影像疊映在真實的世界之上。這是日本慶應義塾大學田智前（Susumu Tachi）和很多學者的設想。他正在設計一種幻境與真實混合的護目鏡。他的第一個計畫就是使東西消失在空中。

我在東京訪問田智前教授，親眼看見他那令人印象深刻的真實與虛擬混合的實驗。一個簡單的應用是使一個物件消失（至少在你的護目鏡中）。首先，我先穿上一件特別的淡咖啡色雨衣。當我張開雙臂時，它看起來像是一片大帆。然後一個攝影機把焦點集中在我的雨衣上，另一個攝影機則攝製我背後的景色（有巴士和汽車在路上移動）。刹那間，電腦將這兩個影像混合在一起，所以我身後的影像，也如同投射在螢幕一般，投射我的雨衣上。如果你從一個特殊眼鏡看出去，我的身體消失了，剩下的就是汽車和巴士的影像。由於我的頭部是在雨衣上方，所以看起來像是我的頭部，漂浮在空中，而身體消失了——如同哈利波特披上他的隱身斗蓬。

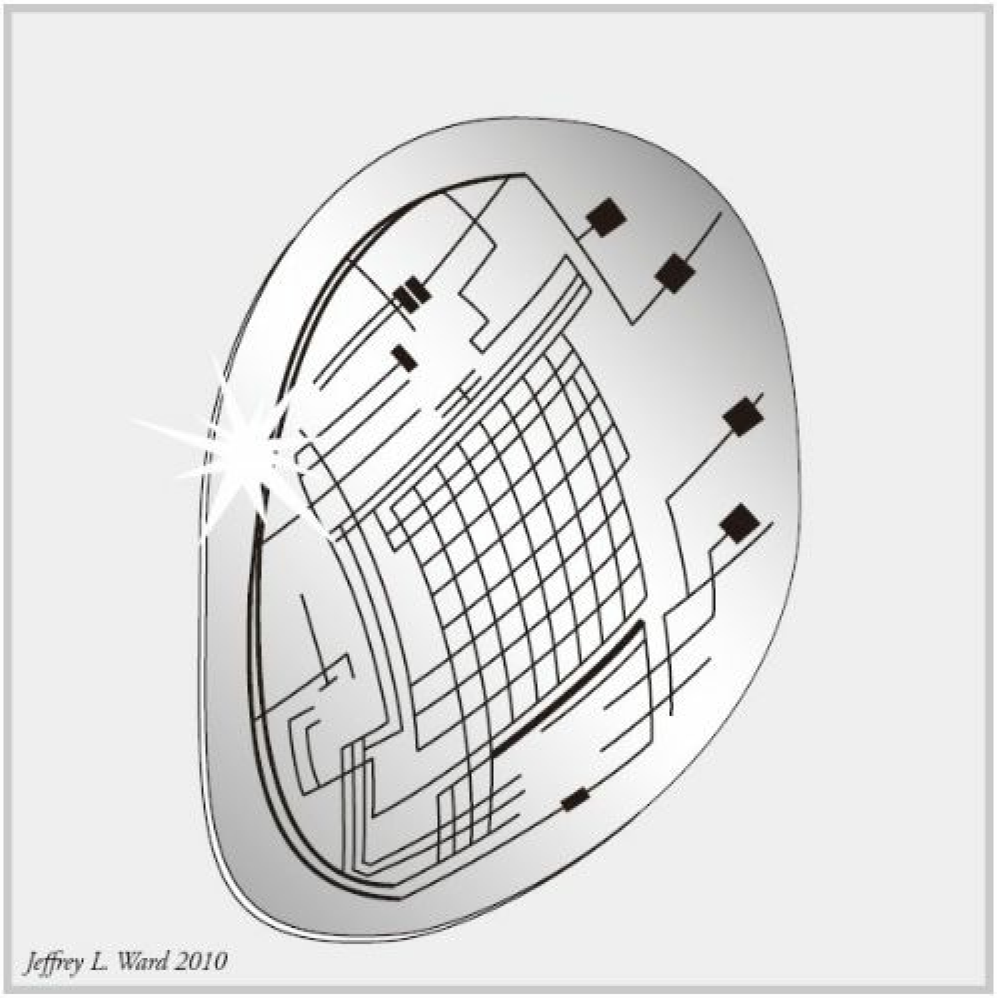
其後，田智前教授又讓我看到一些特殊護目鏡。戴上它們，我可以看到真實的物體，然後讓他們消失。這並非真的看不見，而只限於戴上可以混合兩種影像的特別護目鏡才有效。不過，它只是田智前教授的大計畫中的一部分。他的偉大計畫有時也被稱為「擴增實境」。

到了世紀中期，我們將會生活在充分發揮作用的網路世界，在其中的真實世界已與電腦中的影像融合。這樣將會根本改變工作環境、商業、娛樂以及我們的生活。擴增實境會為市場帶來立即性的影響。第一個商業應用將會是使物體消失，或使人看見本來看不見的東西。

例如，如果你是一個飛行員或汽車駕駛，你將可以看見周邊三百六十度的景象，連腳下也看得見。因為你的護目鏡或隱形眼鏡，允許你看透飛機或汽車的外壁。這將會消除視界的死角（它是許多意外和死亡的肇因）。在近距離空戰中，飛行員不管敵人飛到任何地方（在自己下方也不例外），都能追蹤到他們，就如同噴射機是透明的一般。駕駛人可以看到所有的方向，因為微小的攝影鏡頭將會監控周圍三百六十度的空間，並將影像傳到他們的隱形眼鏡中。

如果你是正在修理太空船的太空人，你會發現這種科技很有用，因為你可以看穿牆壁、隔板牆以及船身。它也能解救性命。如果你是建築工人，在地下充滿管線和閥門的環境中進行修理工作，你將會知道正確的連接方式。這點在蒸汽爆炸時尤其重要，那時藏在牆後的管線急待修理，而且必須迅速完成。

同樣地，如果你是探礦者，你將可以穿過地表，看到地下的水或油。衛星或飛機以紅外線和紫外線所拍攝的一個礦區的照片，可以在分析後送到你的隱形眼鏡中，給你一份關於這個地點的3D分析，以及地表底下的蘊藏。當你走過不毛之地，你將會透過眼鏡「看到」有價值的礦藏。



圖說：網路隱形眼鏡可以辨識人臉，顯示他們的個人資料，並以字幕模式翻譯他們正在說的話。遊客將用它們見識到古代紀念碑復活。藝術家和建築師將用它們來操作並重組他們的虛擬創作。擴增實境有無窮的可能性。

除了使物體消失，你也可以反過來做：看見本來看不見的東西。

如果你是一個建築師，你將可以繞行於一個空房間，突然間，「看到」了你所設計的建築的完整3D影像。當你巡視每一個房間時，你的藍圖上的設計將會在你面前跳出來。空房間將於轉瞬間活了過來，有傢具、地毯和牆上的裝飾，這種技術容許你的創作在實際建造以前，先以3D視覺化。只要移動你的手臂，你就能創造出新的房間、牆壁和傢具。在這個擴增的世界，你將會有魔術師的力量。只要揮動魔杖，就能創造出你想要的東西。

如你所知，擴增實境對商業與工作場所的潛在影響非常巨大。實際上每一種工作都能因它而更加豐富。此外，我們的生活、娛樂以及社會都會因此一科技而大大地改善。

例如，當你在博物館中參觀，從一個展區到另一個展區時，你的隱形眼鏡將同時傳送給你每一件展覽品的介紹資料；當你通過時，一個虛擬的導遊將會為你做網路導覽。如果你訪問某些古代廢墟，你將可能「看到」在他們的全盛時期的建築和紀念碑，以及歷史性軼事的完整重建。當你徘徊於羅馬帝國的遺跡時，它們將會回復活生生的場景，並附加評論與註解，而非殘破的圓形石柱與荒草。

北京理工大學已經朝此方向走了一小步。他們將一八六○年英法聯軍所毀的圓明園，在網路世界中重新建立起來。今天，傳說中的花園，留下的只有軍隊劫掠後的廢墟。但如果你從一個特殊的觀景點去看廢墟，你可以看到完整的花園以燦爛之姿呈現眼前，未來這樣的觀景點將隨處可見。

發明家尼科拉斯·尼克（Nikolas Neecke）創建了一個更先進的系統。他為瑞士西北部的巴塞爾市建立了步行導覽。當你在它的古老街道上散步時，你看見古代建築甚至人民生活的影像疊映於眼前，使你彷彿走進時光隧道。電腦為你定位，並為你在護目鏡中顯示古代景象，就如同你回到了中世紀。現在，你必須戴上很大的護目鏡和背著沉重的背包（內裝GPS儀器和電腦）才可能達到這種效果，但未來，你只要戴上隱形眼鏡就可以了。

如果你在異國土地上開車，所有的儀表都將以英語（或你懂得的語言）顯示在你的隱形眼鏡上，所以你不必向下瞄它們。你會看到路標和附近標的物（例如觀光景點）的解說。你也可以看到快速翻譯的路標。

徒步旅行者、露營者或喜愛戶外活動者，將不只是透過隱形眼鏡得知他身處的位置，身邊看到的動植物的名字也能知道了；此外，還能看到該地區的地圖及接收天氣報告。它也能觀測到可能被草叢或樹林遮蔽的小路或露營地點。

想租公寓的人，將能在走過街道或開車經過時，知道還有哪裡有房子等待出租。任何待售公寓或房子的價格以及生活便利設施等等，都將顯示在你的眼鏡中。

凝視夜空，你將可看見所有的星球和星座清晰地描繪出來，如同你正在觀賞天文館的星空秀，但不同的是此時你看到的可是真正的星星。你也可以看到許多銀河、遠方的黑洞、以及其他有趣的天文景觀的方位，還可以下載有趣的相關演講。

除了能夠看透物體和訪問異地，擴增的視界在你臨時需要特定資訊時，尤其重要。

例如，如果你是一個必須記憶大量資料的演員、音樂家或表演者，未來你將可以在鏡片中看到所有的文字或音樂。你不需要自動提示器、提示卡、樂譜或筆記來提醒自己。你將不再需要勉強記住任何事物。

其他的例子還包括：

☆如果你是錯過了演講的學生，虛擬教授可以為你講授任何主題，你可以下載來看。透過虛擬臨場遙控，一個真正教授的影像，會出現在你面前，回答你的任何問題。你也可以透過隱形眼鏡看到實驗示範及錄影帶等。

☆如果你是戰場的士兵，你的護目鏡或耳機，會給你最新的資訊、地圖、敵人位置、敵方的射擊方向、以及上級的指示等。當你與敵人交火，子彈颼颼地亂竄時，可以看穿障礙和山崗，知道敵人在何處——因為頭頂的無人駕駛飛機可以找出他們的位置。

☆如果你是外科醫生，正在做複雜的緊急手術，你能看透病人身體（經由手提磁振造影機）、進入體內（經由在體內移動的感應器），也能取得病歷和過去手術的錄影。

☆如果你在玩電動遊戲，你可以在隱形眼鏡中，完全沉浸在網路世界裡。雖然是在一個空房間，你可以看見所有的朋友都以完美的3D影像出現；在你準備與想像中的外星人交戰之前，你會先經歷一些外星景觀，那就如同身處外太空的戰場上，你和戰友都陷入爆炸的光線中。

☆如果你需要查閱運動員統計資料或運動的詳細資料，它會立刻映入你的隱形眼鏡中。

這意味著你不再需要手機、時鐘或手錶或MP3。所有的各式手持物品的圖標，都會投射在你的隱形眼鏡上，可以隨時取用。電話、音樂網站等都可如此存取。你家裡的許多器具和精巧小器械，都可以用擴增實鏡來取代。

另一個拓展擴增實境應用範圍的科學家，就是麻省理工學院媒體實驗室的派蒂·梅斯（Pattie Maes）。她不用特殊的隱形眼鏡、眼鏡或護目鏡，而是打算將電腦螢幕投射到我們環境之中的平常物體上。她那被稱作「第六感」的實驗計畫，包括在脖子上掛著一個小照相機和投影器（如同佩戴著一個大獎章），讓你可以把電腦螢幕的影像投射到你面前的任何物體上（例如牆或桌子）。按一下想像中的按鈕就會自動地打開電腦，如同你敲擊真正的鍵盤一般。由於電腦螢幕的影像可以投射在面前任何平整固定的物體上，你可以將好幾百種東西轉變成電腦螢幕。

還有，你可以把特製的塑膠套子戴在手指頭。當你移動手指頭時，電腦就會在牆上的電腦螢幕執行你的指令。例如，透過手指的移動，你可以在電腦螢幕上畫圖。你可以不用滑鼠，改用手指控制游標。如果你用雙手比出一個方形，你可以啟動一個數位相機，並開始照相。

這也表示，當你在購物時，你的電腦會為你掃描許多不同的產品，認清它們的品名，並為你讀出他們的成分、卡路里含量以及其他顧客的評價。

擴增實境的另一種應用將是使用「背向散射X光」（backscatter X-ray）過程的X光顯像，與《超人》（Superman）漫畫中所見的X光顯像極為相似。如果你的眼鏡或隱形眼鏡可以對X光感應，它可能有能力看穿牆壁。環顧四周，你可以如同漫畫中所見一般看穿物體。每一個小孩子，在第一次讀到《超人》漫畫時，都會夢想「比子彈飛得快，比火車頭還有力」。成千上萬的小孩都會穿上披肩，跳出條板箱，飛上天，並假裝具有透視眼。這些在擴增實鏡中，都是有可能的。

普通的X光的一個問題就是，你必須將X光底片放在物體背後，將物體暴露在X光下，然後才處理底片。然而「背向散射X光」會解決這些問題。首先，你讓X光從光源放射出來，充滿整個房間。然後，他們會彈

跳出牆，它會穿透你想檢驗的物體。你的護目鏡可以感受已穿透物體的X光。由「背向散射X光」看到的影像可能跟漫畫中所見的影像一樣好。（只要提高護目鏡的感光度，我們就可以降低X光的強度，使健康的風險降到最低。）

全能翻譯機

值得注意的是，在《星艦迷航記》、《星際大戰》以及幾乎全部的科幻影片中，所有的外星人都能說一口標準英語。這是因為有一種「全能翻譯機」，容許地球人即時與任何外來文明溝通，避免了使用冗長乏味的手語及原始手勢的不便。

雖然這曾被認為是不切實際的未來想像，但是某種形式的全能翻譯機已經存在。這意味著，如果你是未來身處異國的旅客，在跟當地人交談時，你會在隱形眼鏡中看到說明字幕，如同你正在看外國電影。你也可以讓電腦為你做有聲翻譯，直接送到耳朵。在這種情況下，兩個不懂對方語言的人，只要都有全能翻譯機，就能透過耳中聽到的翻譯，做到「雞同鴨講」，順利對話。這種翻譯不會是完美的，因為總是會有些成語、俚語以及修辭等問題，但是它將足以讓你了解對方的談話要點。

科學家要實現全能翻譯有幾種方式。第一是創造一種能將語言轉換成書寫的機器。在一九九○年代中期，第一個能辨識語言的商業用途機器上市。它們可以辨識四萬字，正確率百分之九十五。由於典型的日常會話只用到五百至一千字，這些機器已能應付裕如。人聲被轉錄成文字以後，每一個字都會被電腦字典翻譯成另一種語言，然後是最難的部分：將個別的字組合成有意義的文字，加上俚語，以及口語表達等等，這些都需要對語言的細微差異有深入的了解才行。此一領域被稱為「電腦輔助翻譯」（computer assisted translation,CAT）。

在匹茲堡的卡內基梅隆大學（Caenegie Mellon University），是另一種翻譯方式的開路先鋒。那裡的科學家已經造出可以中翻英、英語譯成西班牙語或德語的原型機器。他們將電極附在說話人的頸部和臉部，獲得肌肉收縮訊息，並對說出的話進行解碼。由於字和詞可能動口而不出聲，所以他們的工作不需要任何音頻設備。然後，由電腦將這些字詞翻譯，並以聲音合成器說出。在只用一百至兩百字的簡單對話中，他們已

經達到百分之八十的正確性。

其中的一位研究員譚加‧休茲（Tanji Schultz）說：「主要的構想是，你可以動嘴說英語，而呈現出來的卻是中文或其他語言。」未來，電腦會以讀脣術懂得你的談話對象，因而不需電極輔助。所以，原則上，讓兩個說不同語言的人進行即時對話是可能的。

未來，曾經悲劇性地妨礙不同文化間的相互了解的語言障礙，將會逐漸因為有了這種全能翻譯器和網路隱形眼鏡或鏡片而化解。

雖然擴增實境打開了一個全新的世界，但它也有局限性。不過其問題不在於硬體，頻寬也不是限制因素，因為光纖所能傳送的資訊數量並無限制。

真正的瓶頸在軟體。軟體只能用陳舊的方法來創造。要有人靜靜地坐在椅子上，加上紙、筆和手提電腦，才能寫出一行接一行的程式碼，使想像的世界發生。我們可以大量製造硬體，透過堆疊較多的晶片來增強它的運算力，卻無法大量製造大腦。這意味著真正的擴增實境的出現，需要好幾十年，直到世紀中期。

全像技術與3D立體影像

到了世紀中期，我們可能看到的另一種先進技術，就是真正的3D電視和電影。早在一九五○年代，要看3D電影，就要戴上厚重的眼鏡，鏡片有紅與藍的顏色。這是利用左右眼不在一條直線上的事實，電影放映出兩個影像，一個藍色，一個紅色。這兩個鏡片扮演過濾器的角色，給予左右眼不同的影像，因而在大腦結合兩個影像時，產生了看到三度空間的錯覺。所以，深度的感覺只是一個騙局。（兩眼相距越遠，深度感覺越大。這也可以解釋，為什麼某些動物的眼睛凸出，目的就是要感受最大的深度。）

3D眼鏡之後有了改進，就是以偏光鏡片製造，在左眼和右眼顯示出兩種不同的偏光影像。如此一來，我們看到全彩的3D影像，而非只有藍色和紅色。由於光是一種波，它可以上下或左右振動。一個偏光鏡片，只容許單一方向的光通過。所以，如果你的眼鏡裡有兩個不同方向的偏光鏡片，你就能創造出3D（立體）效果。再精緻一點的3D版本，將可

以把兩個不同的影像投射在隱形眼鏡上。

需要佩戴特殊眼鏡的3D電視已經上市。但很快地，3D電視將改用柱狀透鏡，而不再需要特殊眼鏡。電視螢幕必須特製，能夠以略微不同的角度，分別為兩眼投射兩組分隔的影像。由於你的兩眼看到的是分開的影像，所以會有3D的錯覺。不過你的頭必須放對位置，當你注視螢幕時，你的眼睛必須放在最佳觀看區內。（這一種方法利用了廣為人知的視力錯覺。在某些新穎的商店中，當我們走過其擺設的圖片時，會看到它們魔術般的立體變化。這個效果，是要先選用兩張圖片，將每一張都切割成許多小條，然後穿插散置這些小條，創造出一種複合的影像。然後，將一個有許多垂直凹槽的柱狀透鏡薄片放在複合影像之上，每一個凹槽精確地置於兩小條上。凹槽特別塑形，當你從某一角度看它時，你可以看到一小條，換一個角度又可見到另外一條。因而，走過鏡片，我們看到每一個圖片突然變成另外一個圖片，然後又很快地變回來。3D電視將會以移動影像取代這些靜止的圖片，以達到不用眼鏡而有相同的效果。）

但是，最先進的3D版本，將是全像技術（holograms）。不用任何鏡片，你將精確地看到3D影像的正面光波，如同它是放在你的面前。全像技術已經出現數十年（他們出現在新潮商店中、信用卡上，以及許多展覽中），它們也經常是科幻電影中的特寫鏡頭。在《星際大戰》情節中莉亞（Leia）公主傳送給叛軍聯盟成員的一段3D全像的悲傷訊息，以動作示意。

問題是，這種全像圖很難製作。

全像圖是將單一雷射光束分裂為二。其中之一束落在你要攝影的物體上，然後彈回落在一個特殊的螢幕上。另一束則直接落在螢幕上。兩束雷射光混合創造出一個複雜的互相干擾型態，含有原有物體的「凍結」3D影像，會被螢幕中的一個特殊底片捉住。然後，透過投射另一束雷射光到螢幕上，原有物體的影像就會以完全的3D影像活了過來。

全像電視有兩個問題。其中之一的問題是，影像必須投射在螢幕上。坐在螢幕前可以看見原始物體的精確3D影像。但我們無法伸手碰觸它，因為見到的3D影像只是一種錯覺。

這就是說，如果全像電視前觀看3D足球賽，不論你如何移動，面前的

影像如同真的隨之移動。那就像是你自己正坐在五十碼線上，離球員只有數英吋的距離內觀看。但是如果你衝過去抓球，你會撞進螢幕。

而真正妨礙全像電視發展的技術問題在於資訊的儲存。真正的3D影像包含極大量的信息，比2D影像的儲存大很多倍。電腦通常只處理2D影像，因為影像是被分解成細小的點（稱為像素），每一像素由一個小電晶體照亮。但是若要讓3D影像移動，每秒必須閃動三十次。速算的結果顯示，產生移動的3D全像影像所需耗費的訊息量，遠遠超過今日網際網路的能力。

到了世紀中期，當網際網路的頻寬以指數成長以後，此一問題可能會被解決。

真正的3D電視會是什麼樣子？

可能性之一，是一個圓筒或半球形的螢幕，而你坐在中間。當全像影像放射到螢幕上時，我們看見3D影像環繞周圍，如同它們真的就在那兒。

遙遠未來（二○七○─二一○○）

以心役物

到了本世紀末，我們將會直接以念力控制電腦。如同希臘諸神，當我們「想到」某些指令，電腦便會按照命令執行。此一科技的基礎已經鋪設完成。但可能要花好幾十年才能趨於完美。這個革命可以分為兩部分。第一，念力必須能夠控制身邊的物體。第二，電腦要有能力將人的願望解碼，以便將它實現。

第一個重大突破在一九八八年達成。美國艾墨瑞大學（Emory University）和德國杜賓根大學（University of Tübingen）的科學家，將一個細小的玻璃電極，直接植入一個因中風而癱瘓的五十六歲男性大腦中。電極被連至電腦，以分析他的大腦訊號。這個中風病患可以看到電腦螢幕上的游標影像。然後，透過機能反饋療法（biofeedback，利用機械醫療作用，使病人自動控制和調整正常機能的醫療技術），這位病患僅僅透過念力，就能控制電腦的游標。這是電腦與人腦的第一次接觸。

這種技術最精緻的版本，是由布朗大學（Brown University）神經科學家約翰‧多諾修（John Donoghue）發展出來的。他發明了一種被稱為「腦門」（BrainGate）的裝置，來幫助因遭受腦部受傷而衰弱的人溝通。二○○六年他由於發明了感官媒介，登上了《自然》（Nature）的封面。

多諾修告訴我，他的夢想是：運用資訊革命的最大力量，讓「腦門」對腦傷的治療產生革命性的影響。此一技術已經對病人的生活產生重大的影響，而他也對技術的進一步發展存有高度希望。他的研究興趣與個人遭遇有關。他的童年因為退化性疾病被局限於輪椅上，因而深知無助的感覺。

他的病人，包含完全癱瘓、也無法與所愛的人溝通，但腦部仍然可以活動的中風病人。他曾在中風病人大腦控制運動的區域內放置一個晶片（只有四公釐寬）。這個晶片被連結到可以分析並處理大腦訊號的電腦上，最後並將訊息傳到一台手提電腦裡。

起初，病人無法控制游標的位置，但能看到游標的移動。經過嘗試錯誤，病人學會控制游標，數小時後，就能將游標放到螢幕中的任何地方。經過練習，中風病人可以閱讀、寫電子郵件、玩電動遊戲。一般而言，凡是可以透過電腦控制的任何功能，癱瘓的病人都能辦到。

當初，多諾修是從四個病人開始。其中兩人有脊椎傷害，一個中風，第四個則有肌萎縮性脊髓側索硬化症（amyotrophic lateral sclerosis,ALS）。其中一人，四肢痲痹，頸部以下全部癱瘓，只花一天就能熟練用念力操作游標的移動。今天，他可以控制電視、移動電腦游標、玩電動遊戲，並且閱讀電子郵件。病人也能透過操控電動輪椅來控制自身的移動。

簡單地說，這對完全癱瘓的人來說，簡直就是奇蹟。之前，他們被困在身體裡面，毫無希望。但未來，他們已經在網路上搜尋，並與世界各地的人對話。

我曾經在紐約林肯中心參加一個盛會，向偉大的天文學家史蒂芬‧霍金（Stephen Hawking）致敬。看到他被束縛在輪椅中，實在令人心碎。除了少數面部肌肉，他已無法移動任何部位，只能由護士扶著他那軟弱的頭部，推著輪椅移動。他要花好幾小時，甚至好幾天掙扎著透過聲音合成器與人溝通簡單的想法。我很想知道，他是否來得及利用「腦門」科

技的好處。剛好這時，同樣在觀眾群中的多諾修也出現面前跟我打招呼。所以，也許「腦門」是霍金的最佳選擇。

杜克大學（Duke University）的另一群科學家，也在猴子身上達成了類似的結果。米古爾･尼科列力士（Miguel A.L.Nicolelis）和他的團隊曾將一個晶片放在猴子腦中。晶片與機器手臂相連，剛開始，猴子不懂得如何操作機器手臂，只是胡亂地擺動。但經過一些練習，可以用牠們的念力慢慢地控制機器手臂的移動——例如，移動它以便取得香蕉。

這也意味著，終有一天，我們將能以純粹的思想控制機器。癱瘓的人，將能用這種方法控制機械式的手與腳。例如，可以讓大腦繞過脊椎，與機械手腳直接連接，使病人能再走動。這也將為我們透過念力控制世界立下基礎。

讀心術

如果大腦可以控制電腦或機械手臂，那麼，電腦能否在沒有電極植入人腦的情況下，讀出人的心思？

自一八七五年以來，人們已經知道，大腦透過神經元傳送電流，產生微弱電子訊號（將電極放在頭部周圍即可測得）。分析這些電極測得的脈衝，可以記錄腦波。這就是所謂腦電波儀（electroencephalogram,EEG）。它可以記錄腦部的大致變化，如正在睡覺，以及心情（如激動、憤怒等）。腦電波儀的輸出可以顯示在電腦螢幕上，讓受測對象看到。過了一段時間，受測者可以只靠思想就移動游標。杜賓根大學的尼爾斯･畢爾包默（Niels Birbaumer）已經能夠訓練部分癱瘓的人，用這個方法打出簡單的句子。

連玩具也能因此沾光。有些玩具公司，如神念科技（Neurosky），已經推出內含EEG類型電極的頭飾帶。如果你用某種特定的方式集中念力，你可以啟動頭飾帶中的EEG，透過它控制玩具。例如，你可以只用內心的意念就能使圓筒內的乒乓球漂浮起來。

EEG的優點是：它不需精巧、昂貴的設備，就能迅速偵測到腦部發出的不同頻率。但它的一大缺點是：它無法詳細分辨腦波來自大腦的哪一特定部分。

有一種更加敏感的方法，就是功能性磁振造影（functional magnetic resonance imaging,fMRI）掃描。EEG和fMRI掃描有重大的區別。EEG掃描是一種被動的裝置，它只是從大腦接收電子訊號，所以我們無法有效斷定來源的位置。fMRI機器利用無線電波創造的「迴響」，看到活組織的內部。這容許我們準確地找出不同訊號的位置，給我們令人驚嘆的大腦內部的3D影像。

fMRI機器相當昂貴，也需要一個裝滿龐大設備的檢驗室配合，但它已經帶來令人興奮的消息，讓我們知道大腦的思考如何運作。fMRI的掃描讓科學家能夠找到血液中血紅素所含氧氣的位置。因為氧化血紅素含有支持細胞活動的能量，偵測到這種氧的流動就讓我們可以追蹤大腦中的思考。

加州大學洛杉磯分校精神病學家喬許華‧弗里曼（Josha Freeman）說：「這就像在十六世紀的一個天文學家，突然有了望遠鏡的發明。過去一千年，多少聰明人想要解開天上的祕密，但他們對肉眼所不及的世界只能進行猜想。然後，突然間，一個新的技術讓他們直接看到那裡。」

事實上，fMRI甚至可以偵測到活體大腦中思想的移動，解析度可以小至○‧一公釐，或小於針尖（可能相當於數千個神經元）。因而fMRI可以提供思考中大腦的能量流動的3D圖像，其正確性令人驚訝。終有一天，我們將造出探測單一神經元等級的fMRI機器，可以辨認出與某一特殊思考相對應的神經元類型。

最近加州大學柏克來分校的肯得利克‧凱（Kendrick Kay）和他的同事有了突破。他們讓受測驗的人一邊接受fMRI掃描，一邊看著不同物體的圖像，例如食物、動物、人物以及各種顏色的普通東西。他們研發了一個軟體，可以將這些物體和fMRI的類型連結在一起。受測者看的圖像越多，電腦軟體越能辨識fMRI掃描的物體。

然後，他們又讓同樣的受測者觀看全新物件，軟體程式往往也能正確地為物件與fMRI掃描配對。顯示一百二十個新物體圖片時，軟體可以正確地認出這些物件百分之九十的掃描。讓受測者看一千個新圖片時，軟體的成功率是百分之八十。

凱說：「要從一大組全新的自然影像中，指認某一特定影像是可能的。……很快地，就可能只靠測量腦部活動，就能重新建構一個觀看圖片者

的視覺經驗。」

這個研究的目的，是要創立一個「思想字典」，讓每一個被選取的對象都與一個fMRI的影像相對應。透過閱讀fMRI的類型，就能知道受測者在想的是其中哪一個對象。最後，電腦可能要掃描數千個由思考中的大腦流露出的fMRI類型，然後辨識它們。如此，我們或許有可能揭開人類意識之流的密碼。

夢境攝影

不過，這種技術的問題在於，它也許能說出你是不是在想一隻狗，它卻無法使這隻狗的實際影像重現。所以另一個研究方向是，嘗試重建大腦所想到的精確影像，因而創造出一個人思想歷程的錄影。用這個方法，我們也可能製作出夢境的錄影帶。

從史前時代開始，人們就對夢境非常著迷。稍縱即逝的影像，既難回想，又難理解。長久以來，好萊塢常會有人想像，有一天會有一種機器，如同電影《攔截記憶碼》（Total Recall）一般，可以將夢一般的影像傳入大腦，甚至錄下它們。不過，所有這些，純屬猜測。

直到最近，情況改觀了。

科學家在一個向來被認為不可能的領域，得到驚人的進展：對我們的記憶拍下快照，連夢境也有可能。京都高等電信研究所（ATR）電腦神經科學實驗室，在這個領域踏出了第一步。他們讓受測者在某一特定位置看到一個光點。然後他們用fMRI掃描來記錄大腦儲存此一資訊的位置。他們移動光點，記錄大腦儲藏新影像的位置。最後，他們得到一個數十個光點在大腦中儲存的對應方位圖。這些光點定位於一個10×10的網格上。

然後，科學家閃示一個10×10點構成的簡單物件圖片（例如馬蹄鐵）。他們以電腦分析大腦如何儲存這些圖片。腦部儲存的類型，當然足以代表構成馬蹄鐵的影像總和。

這樣做，科學家可建立大腦所看到的影像。在這10×10網格上光點的任何類型，可以由電腦檢視大腦的fMRI掃描後，加以解碼。



圖說：透過EEG（圖左）和透過fMRI掃描（圖右）閱讀人的心思。未來，這些電極將會小型化。我們將能閱讀別人的心思，並能僅以念力控制外物。（左：Daniel Mihailescu/AFP；右：Miguel Alvarez/AFP）

未來，科學家打算增加10×10網格的像素。此外，他們聲稱，這個過程有其普遍適用性。亦即，任何視覺思想甚至是夢境，都可以由fMRI掃描出來。若這是真的，那也就是說，有史以來第一次，我們將能記錄我們所夢見的影像。

當然，我們的心理意象，特別是我們的夢，並非徹底明晰，總是會有一些模糊，但光就能夠深入人類的大腦看到其視覺思想這一點，已經讓人印象深刻。

讀心術的倫理

但這也會產生了一個問題：如果我們可以經常窺知他人的心思，會有何後果？前加州理工學院校長、諾貝爾獎得主大衛·巴爾的摩（David Baltimore）對此感到憂心。他寫道：「我們能夠窺知別人的心思嗎？……我不以為那純屬科幻小說題材，它可能創造出地獄般的世界。試想想，你在追求伴侶時，心思會被人看透；或者談判合約時，人家讀得出你的心思。」

他推測，多數時間，讀心術會造成尷尬但非災難性後果。他寫道：「我聽說，如果你讓一個教授在演講中突然暫停……就會發現有相當數量學生的心思正陷入性幻想中。」

但，也許讀心術不會演變出這樣的隱私問題，因為我們的心思大部分並

不明確。為白日夢或夜夢留下影像或許有一天成為可能，但我們可能會因為圖片的品質而大失所望。我記得多年前讀到的一篇短篇小說：天神告訴一個男人說，他可以擁有任何他想像得出來的東西。他立刻想像出一些昂貴的物品，例如大型豪華轎車、百萬元現金和一個城堡。於是天神馬上將這些東西實現。但是，當這個人仔細檢查以後，他很驚訝地發現，豪華轎車沒有門把或引擎，鈔票的人頭臉部模糊不清，而城堡中則空無一物。當他急於想像出這些東西時，他忘了在想像中的這些影像都只是一般性的概念。

還有，你能否從遠處閱讀別人的心思，仍然是個疑問。目前為止所有研究用過的方法（包括EEG、fMRI和大腦上的電極等），都需要與對象做近距離的接觸。

儘管如此，最後可能還是會通過法律，限制未經授權的讀心術。還有，也會有人發明干擾、阻擋或將我們的腦波分散混淆的裝置。

真正的讀心術仍然需要數十年才會出現。但至少，一個fMRI掃描器，將會發揮原始測謊器的作用。說謊話會比說真話使大腦的更多中心出現亮點。說謊暗示著你知道真相卻同時想著謊言以及衍生的大量後果，而需要比說真話更多的能量。因此，腦部的fMRI掃描應可偵測出額外的能量消耗。現在，科學社群對於讓fMRI測謊器做最後裁定，還有一些保留。此一科技實在太新，尚難說是完全不會出差錯的測謊方法。支持推動它的人說，進一步的研究會使它趨於完美。此一科技現在已經被普遍認可。

現在已有兩家商業公司出售fMRI測謊器，聲稱成功率在百分之九十以上。印度的一個法庭曾使用fMRI來裁決一個個案，另外美國法庭也有一些個案引用fMRI。

普通的測謊器並非測量謊言，它們只是測量緊張的跡象，諸如流汗量增加（透過分析皮膚導電率來測量）和心跳加快。大腦掃描測量腦部活動的增加，但它與謊言之間的關連若要被法院採信，仍有待終結性的證明。

可能還需要好幾年的測試，去探索fMRI測謊器的限制和正確性。在此期間，麥克阿瑟基金會最近提供一千萬美元給「法律與神經科學計畫」，來探討神經科學對法律的影響。

我的**fMRI**掃描

我有一次接受fMRI機器掃描的經驗。為了製作一個BBC及Discovery頻道合作的紀錄片，我飛往杜克大學。在那裡，他們將我放在一個伸展台，然後將台子插入一個巨大的金屬圓筒中。當一個強大的磁力（地球磁力的兩萬倍）打開時，我大腦中的原子都被這個磁場調整為同一方向，如同旋轉的陀螺的軸線指著同一方向。然後一個無線電波脈衝送至我的大腦，將我的原子中的一些原子核顛倒過來。當這些原子核最終回復正常時，它們散發出一種可被fMRI偵測到的細微脈衝（或「迴響」）。分析這些迴響，電腦可以處理訊號，然後重新組裝出我的大腦內部的3D圖像。

整個過程完全沒有痛苦、也沒有傷害。送入我身體的放射線已被非離子化，不會因為撕裂原子而傷及我的細胞。雖然被強於地球數千倍的磁場暫停運作，我的身體並未感受一點點的變化。

我接受fMRI掃描的目的，是要精確地斷定出，我的某些特定的意念從哪裡製造出來。具體來說，我們的大腦中有一個小小的生物「時鐘」，就在兩眼之間，鼻子的後面，大腦在那兒計算秒鐘與分鐘。這個精緻的地方如果受傷，會導致時間感覺的扭曲。

當我在掃描器裡面時，我被要求計算經過了幾分幾秒。不久，fMRI的圖片製作出來，我可以清楚地看到，在計算幾秒時，鼻子後面有一個亮點。我領悟到，我正在見證一個生物學新領域的誕生：追蹤大腦中與某一特定意念對應的精確位置，這也是讀心術的一種類型。

三度儀和可攜式腦部掃描儀

未來，磁振造影機器不會像現在的醫院中看到的那種重達數噸、占據整個房間的大怪物。它可能跟手機、甚至一分錢一樣小。

一九三三年德國美因茲馬克斯普朗克聚合物研究所（Max Planck Institute for Polymer Research）的伯恩哈德‧布拉米克（Bernhard Blümich）和他的同事，偶然間有了一個可以創造出小型磁振造影機器

的好構想。他們造了一個命名為「磁振造影滑鼠」（mobile universal surface explorer,MRI-MOUSE）的新機器，目前約有一英尺高，但也許有一天會變成咖啡杯大小的磁振造影機器，在零售店出售。這可能使醫療發生革命，因為人們將可以在家私下執行磁振造影掃描。布拉米克夢想著在不久以後的某一天，人們隨時可以個人用「磁振造影滑鼠」滑過自己的皮膚，看到身體的內部。電腦將會分析圖像，並診斷出任何問題。他下結論說：「也許類似《星艦迷航記》中的三度儀的某種東西，已經離我們不遠。」

磁振造影掃描所依據的原理跟羅盤的指針相似。羅盤指針的北極很快地與磁場一致。所以當身體被放進磁振造影機器時，原子核就會如同羅盤指針一般，與磁場對齊。然後一陣無線電波被送入體內，使原子核方位短暫顛倒。最後，原子核轉回原來的位置，散發出無線電磁波的次波（或迴響）。

迷你磁振造影機器的關鍵在於它的非一致性磁場。通常，現在的磁振造影機器之所以會很龐大，是因為必須將身體放入絕對一致性的磁場。磁場的一致性越高，製作出來的圖片越詳細。以今日水準，解析度可達十分之一公釐。為了獲得此一一致性磁場，物理學家先做兩個直徑約兩英尺的大線圈，並列在一起。這就是所謂「亥姆霍茲線圈」（Helmholtz coil），在兩個線圈之間的空間，提供一致性的磁場。人體沿著兩個大磁場的軸線送入。

但是，如果你用的是不一致性的磁場，得到的只是扭曲失真而無用處的影像。數十年來，這一直是磁振造影機器的問題。但布拉米克以一種聰明的方法來進行。為了彌補扭曲，他傳送多次電磁脈衝進入樣本，再偵測產生的多次迴響。然後以電腦分析這些迴響，並對非一致性磁場產生的扭曲部分加以修補。

今天，布拉米克的手提磁振造影滑鼠機器，使用一個U形的小磁鐵，在U形的兩個終端形成一個北極和一個南極。這個磁鐵被放在病人的上方，移動磁鐵時，人們可以看到皮下數英吋。磁振造影滑鼠不像標準的磁振造影機器需要特別的插頭輸出巨大電力，它消耗的電力僅與普通的燈泡差不多。

布拉米克的一些早期測試，是把磁振造影滑鼠，放在跟皮膚一樣柔軟的

橡膠輪胎上測試。這一點可以立刻應用於商業：迅速掃描產品的瑕疵。傳統的磁振造影機器不能應用於含有金屬的物體（例如有鐵圈的輻射式輪胎）。磁振造影滑鼠只用到很微弱的磁場，所以沒有這種限制。（傳統磁振造影機器的磁場比地球磁場強二萬倍，許多護士和技師在磁場啟動時，曾因金屬工具突然跳起來而受到嚴重的傷害。磁振造影滑鼠沒有這種問題。）

這個東西不僅非常適合分析含金屬的物件，它也可以分析因太大而無法放入傳統磁振造影機器，或者無法搬離原位的物件。例如，在二○○六年，磁振造影滑鼠就曾經成功地製成奧茲冰人（Ötzi the iceman）的體內影像。奧茲冰人是一九九一年發現於阿爾卑斯山的屍體，透過在奧茲身上移動的U形磁鐵，它成功地剝開冰人身上不同層次的包裹物。

未來，磁振造影滑鼠將可能進一步微型化。只要用手機大小的器具，就能為大腦做磁振造影掃描。於是，掃描大腦來讀出某人的心思就不再成為問題。它甚至也會類似功能較小的EEG（你要戴上塑膠罩子，有許多電極貼在頭上）。如果你將這些可攜式磁振造影小碟片放在不同的指尖，然後將它們放在某人的頭上，這將類似《星艦迷航記》中瓦肯人（Vulcan）所演出的心電感應。

心靈傳動和神力

這一進展的終點就是達到心靈傳動（telekinesis），也就是神話中能以純粹意念控制物體的神力。

例如，在電影《星際大戰》中，原力（Force）是一種遍及整個星系的場（field），它突然釋放絕地武士（Jedi）的心靈力量，允許他們用念力控制物體。使用原力的力量，就能使光劍、雷射槍甚至整個星船浮起來，並控制其他物體的行動。

但我們不必旅行到遙遠的星系，才能利用這個力量。到了二一○○年，當我們走進一個房間，我們將能以意念控制電腦，而電腦則會控制周圍的東西。移動笨重的傢具、重新擺設桌子、修理東西等等，都可能用意念去達成。這對必須用兩隻以上的手來操作器械的工人、消防隊員、太空人以及士兵都有極大用處。我們將能夠只是想到騎車、開車、打高爾夫球或籃球、或想玩其他複雜的遊戲，就能辦成這些事。

由於超導體的開發，以意念移動物體將成為可能。我們將在第四章再對超導體詳細解說。到本世紀末，物理學家將有可能發明可在室溫操作的超導體，因而容許我們創造出只需小量能量的巨大磁場。如同二十世紀可以稱為電力的時代，未來將為我們帶來室溫超導體，因而進入磁力時代。

現在要花費很大，才能創造一個強大的磁場，但未來可能幾乎免費。這可以容許我們降低火車和貨車的摩擦力，產生運輸革命，消除電力傳輸的耗損。這也允許我們以單純意念移動物體。只要將微細的超導體放入各種物體中，我們幾乎可以隨意移動它們。

在不久的將來，我們將假定每一件東西裡面都有一個小晶片，使它變聰明。在更久的將來，則假定每一件東西裡面都有一個微細的超導體，使它可以爆發出磁力能量，足以讓東西在房中移動。例如，假定一張桌子含有超導體。平常，這個超導體不帶電流。但是當微弱的電流加入後，它會創造出強大的磁場，足以送它通過房間。透過意念，我們應當可以啟動嵌在某一物體裡面的超導體，因而使物體移動。

例如，在電影《X戰警》（X-man）中，變種生物的邪惡領袖，是能夠透過巨大物體磁性而移動它們的萬磁王（Magneto）。在一個場景中，他甚至以念力移動了金門大橋。但這種力量有其限制。例如，沒有磁性的塑膠或紙，就很難移動。（在《X戰警》電影的結尾，萬磁王被拘禁在一個完全由塑膠製作的監獄裡。）

未來，室溫超導體可能會被藏在普通物件中，甚至連沒有磁性的物體中也有。如果物體裡面的電流啟動，它會變為有磁性，因而可以被你的意念所控制的外在磁場所移動。

我們也會有能力以思想操控機器人和虛擬化身。也就是說，如同電影《獵殺代理人》（Surrogate）和《阿凡達》（Avatar）中，我們可以控制我們代理機器人的行動，甚至感受痛苦和壓力。如果我們需要一個超人的身體，去外太空執行修理任務，或在他人危急時提供救援，這將極為有用。也許有一天，我們的太空人將可安全地停留在地球，控制著飛向月球的超級機器人。這一點，我們會在下一章進一步探討。

我們也必須指出，擁有這種心靈傳動能力並非毫無危險。如同我曾經提及的，在電影《禁忌的星球》中，數百萬年前的一個古代文明，達成了

他們的終極夢想，有能力用心中意念控制任何事物。這是有關他們科技的一個小小的例子。他們創造了一種機器，可以將思想轉變成3D影像。你將這個儀器放在頭上，想像某一事物，然後儀器內就有了3D影像。早在一九五○年代，這種儀器實在太過先進，被電影觀眾認為不可能，但它將在未來數十年內出現。還有，在電影中，有一種儀器可以透過你的心理能量將重物舉起。但就我們所知，我們不需要再為這種科技等待數百年——它已經以玩具的形式出現了。你將EEG電極放在頭上，玩具偵測你腦中的電波，然後如同電影中演出的一般，舉起一個小東西。未來，光憑意念就能玩許多遊戲。兩個以上團隊可能以念力上傳，共同用心念移動一個球，最有辦法把球移動的團隊獲勝。

《禁忌的星球》的高潮或者會使我們猶豫深思。雖然他們的科技成就巨大，但由於忽略了計畫中的一個缺陷，外星人還是毀滅了。他們的強大機器不但觸及他們的意識思想，也進入了他們潛意識的慾望。野蠻的、長久被壓抑的暴力思想，又回到生活中，而機器竟讓潛意識中的惡夢一一實現。在他們達成最偉大創造的前夕，這個強大的文明，恰恰就被這個他們寄望會使他們免於持用工具的科技所毀滅。

不過，對我們而言，這種危險還很遙遠。那樣強大的儀器在二十二世紀以前不會出現。但是，我們還有較為迫切的事要關注。到了二一○○年，我們居住的世界，將會到處都是特性與人類相近的機器人。如果他們變得比我們聰明，結果會怎樣？

第二章　人工智能的未來——機器的興起

機器人會繼承地球嗎？是的，但它們將是我們的子孫。

——馬文·明斯基（Marvin Minsky）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

專家系統

世紀中期（二○三○—二○七○）

模組機器人／機器外科醫生和廚師／感性的機器人／大腦逆向工程／大腦的模型／解析大腦

遙遠未來（二○七○—二一○○）

當機器人有了意識／當機器人勝過人類時／最可能的狀況：友善的人工智能／與機器人融合／星際大戰的機器人之手／代理人與化身／人類能與機器人融合多深？／奇點之路有障礙

神話中的諸神，可以用神力使沒有生命的東西活起來。依據《聖經·創世紀》中所言，上帝以塵土創造了男人，然後「將生氣吹在他鼻孔裡，他就成了有靈的活人」。依據希臘羅馬神話，女神維納斯（Venus）讓雕像有了生命。藝術家畢馬龍（Pymalion）因愛上自己的雕像作品而深感無助，維納斯很同情，特許他實現願望，將雕像變成美女加拉蒂雅（Galatea）。火神（Vulcan，天神的鐵匠）甚至可以創造一群金屬製造的機械僕人，並賦予生命。

今天，我們就像是火神，在實驗室中打造機器。我們並非對著泥土吹氣，而是對著鋼鐵和矽吹氣。但它會使人類獲得自由或使人類變成奴

隸？如果有人閱讀現在的報紙大標題，彷彿已經有了答案：人類將要迅速地被我們的創造物超越。

人類的終結？

《紐約時報》曾有個大標題，表達了對人類終結的焦慮：「科學家擔憂機器會比人類聰明。」全世界頂尖的人工智能領袖們，二○○九年曾於加州的阿西洛馬城（Asilomar）集會，正式討論機器人接管的後果。如同電影中的情節，與會代表追問許多問題，像是：如果機器人變得跟你的配偶一樣聰明，會發生什麼事？

作為此一機器人革命的有力證據，人們指向「掠食者」無人駕駛飛機（它正在阿富汗與巴基斯坦，以致命的正確性瞄準恐怖分子）、自動駕駛汽車、本田機器人阿西莫（ASIMO,Advanced Step Inovative Mobility，意即高級步行創新移動機器人）——世界最先進能走、跑、爬樓梯、跳舞甚至端咖啡的機器人。

會議發起人之一，微軟公司的艾瑞克‧賀維茲（Eric Horvitz），提到會議進行時的激情洋溢，他說：「科技正在提供近乎宗教的遠景，而他們的想法引起了如同狂喜（Rapture）般的共鳴。」（所謂狂喜，本來是指虔誠的信徒在基督復臨時升到天堂。批評人士則以「書呆子的狂喜」來挖苦阿西洛馬城會議的精神。）

同一個夏天，螢幕上最熱門的電影似乎擴大了這個啟示圖。在《魔鬼終結者：未來救贖》（Terminator Salvation）中，一群人類的烏合之眾與占領地球的機器怪獸奮戰。在《變形金剛：復仇之戰》（Transformers:Revenge of the Fallen）中，未來的外太空機器人，以人類為他們星際戰爭的士兵，並以地球為戰場。在《獵殺代理人》中，人們寧可變成完美、漂亮的超人機器去過生活，也不願面對他們老化、衰退的肉體。

由報紙的大標題和戲院的公布片名大招牌來判斷，似乎人類要吞下最後一口氣的時機已經迫在眉睫。人工智能的專家正在嚴肅的問：我們是否會有一天，必須像動物園裡的熊，當我們創造的機器人對著我們丟花生時，我們就要在欄柵後面跳舞？或者，會變成我們的創造物的寵物狗嗎？

但是，仔細檢驗，實情並非如此。沒錯，過去十年的確有很多重大的突破，但是我們應當從正確的角度來看。

二十七英尺長、能夠從空中對恐怖分子發射致命火箭的「掠食者」無人駕駛飛機，是由人類以搖桿控制。這個人類，很可能是年輕的電動遊戲老手，舒服地坐在電腦螢幕後面選擇他的目標。是這個人類，而非「掠食者」，發動射擊。而自動駕駛的汽車，在掃描地平線並轉動駕駛盤時，並非獨立做決定；它們是依據儲存在記憶體中的全球定位系統地圖前進。所以那個全自動、有意識而且兇殘的機器人，仍然還在遙遠的未來。

我們並不意外，雖然媒體聳動地報導，阿西洛馬城會議的某些較為聳人聽聞的預測，多數平日從事人工智能研究的科學家，則較為保守和小心。當他們被問及機器何時會比人類聰明時，科學家們提出的答案非常分歧，從二十年到一千年都有，實在令人訝異。

所以，我們必須區分將兩種不同類型的機器人。第一類型是由人或程式遙控，預先像錄音帶一般擬好劇本，依循精確的指令行動。這些機器人已經存在，也有過很多報導。它們慢慢地進入家庭以及戰場。但如無人類做決定，他們基本上只是一堆廢物。所以這些機器人不應與第二類型的機器人搞混。第二類型機器人真正自主，無須人類輸入的資訊就能自行思想。在過去的半個世紀，正是這種自主的機器人使科學家感到困惑。

阿西莫機器人

人工智能的研究人員往往會指著本田公司的阿西莫機器人圖片，來介紹機器人革命的進展。它身高四英尺三英吋，體重一百一十九磅，看起來像個男孩戴著黑面罩頭盔，並背著背包。阿西莫的確成就非凡：它真的會走路、會跑、會爬樓梯和說話。它可以在房間裡走來走去，拿起杯盤，回應一些簡單的指令，還記得一些面孔。它甚至記得很多字彙，可以說不同的語言。阿西莫是由數十個本田科學家辛勤工作二十年的成果。他們締造了工程的奇蹟。

在兩個不同的場合，我在主持BBC的特別科學節目時，有榮幸在會議中與阿西莫互動。當我與它握手時，它的反應完全與人類的方式一樣。我

對它揮手，它也立刻對我揮手。當我對它說話，請它拿一點果汁給我時，它轉頭以怪異的人類步伐走向飲料桌。的確，阿西莫談話的時候，很像是個有生命的個體。我幾乎就想要請機器人取下頭盔，看看聰明地躲在裡面的孩子。它甚至比我還會跳舞。

乍看之下，阿西莫似乎很聰明，能夠對人類的指令做出反應、進行對話、並在房間內走動。但實情並非如此。當我在電視攝影機前與阿西莫互動時，每一個動作和細節，都要經過小心安排。事實上，僅僅和阿西莫拍攝五分鐘的簡單場景，就花了大約三小時。雖然如此，每拍完一個場景之後，仍然需要一個阿西莫的操控團隊拿著膝上型電腦，匆忙地為機器人重新編訂程序，它就像是一個錄音機在播放預先錄製的訊息，只是按照人類所寫的指令做出動作。雖然阿西莫每年都會變得更加精緻，它還是無法獨立思考。它的每一句話、每一個姿勢和每走一步，都必須由操控人員小心演練。

其後，我與阿西莫的發明人之一，有過一次坦誠的交談。他承認，阿西莫能像人類的行動雖然令人印象深刻，但它的智力只有昆蟲的水準。它的大多數動作，必須事前以程式設定。它可以活生生地走路，但它的行進路線卻須小心設定，否則它就會撞上傢具，因為它無法真正認得房間內的東西。

相較之下，連蟑螂都認得東西，匆匆繞過障礙，尋找食物和同伴，躲避捕食者，計畫複雜的逃亡路線，躲藏在陰影中，然後消失在裂縫裡。這些都發生在數秒間。

布朗大學人工智能研究人員湯馬士‧狄恩（Thomas Dean）承認過，他所製造的行動緩慢的機器人，「還處在有力氣走過大廳，而不在水泥地上留下痕跡的階段」。如同我們以後會見到的，現在最強大的電腦只能模擬老鼠的神經，而且只有幾秒鐘。若要機器人跟老鼠、兔子、狗或貓（然後是猴子）一樣聰明，還需要數十年的努力。

人工智能的歷史

批評家有時候會指出一個固定模式：每三十年，就會有人工智能的從業人員聲稱，超級智慧機器人即將降臨，然後經過實際檢驗，招來反撲。

在一九五○年代，電子計算機於第二次世界大戰後首次發表，科學家迷惑大眾說，機器人可以表現奇蹟似的技藝：拿起積木、下西洋棋，甚至解決幾何問題。彷彿真正的聰明機器馬上就要來了。群眾都大感驚奇。很快地，又有雜誌刊出文章，令人屏息以待地預測，機器人將要進入每一個人的廚房、做晚飯或清掃房間。在一九六五年，人工智能先驅赫伯特‧西蒙（Herbert Simon）聲稱，「在二十年內，機器人將能做任何我們會做的工作。」但接下來的現實是，下棋機器贏不了人類專家，它們只是會下棋而已，別的都不會。這些早期的機器人，像是早期馬戲團中只會一招的小馬，玩不出新把戲。

事實上，在一九五○年代，人工智能的確有所突破，但因它的進展被過度誇張和宣揚，於是引來反撲。一九七四年，在批評者的聯合反對下，美國和英國政府切斷經費補助。人工智能的第一個寒冬降臨。

現在，人工智能研究人員保羅‧阿布拉罕（Paul Abraham）搖著頭回顧一九五○年代那令人心醉的時代，當時他還是麻省理工學院的研究生，似乎任何事情都辦得到。他回憶說：「那就如同有一群人計畫建造一座高塔通往月球，他們都會驕傲地指著藍圖說，今年的塔比去年的高了多少。唯一的困難是，月球並未變得更接近些。」

在一九八○年代，人工智能的熱情又登上高峰。這次五角大廈投入數以百萬計的經費，支持諸如可以深入敵後、偵查敵情、解救美軍然後自行返回總部的智慧卡車計畫。日本政府國際貿易與工業部甚至全力支持一個雄心勃勃的「第五代電腦系統計畫」（Fifth Generation Computer Systems Project）。這個計畫的目標之一是：造出可以會話、有完全的推理能力，並且猜透我們心裡願望的機器人。所有的目標都要在一九九○年代達成。

不幸地，智慧卡車唯一辦到的事情就是走丟了。而第五代電腦在許多誇耀之後，沒有任何解釋就悄悄地放棄了。美好的空言又再度超越了現實。事實上，一九八○年代的人工智能的確有真正的進展，但因進步被過度宣揚，所以二度反撲又來了，造成了第二個人工智能寒冬。這期間，補助款用盡了，理想幻滅的科技人成群地離開了。人們痛苦地明白，這其中還缺少了某種東西。

一九九二年，人工智能研究人員為電影《二○○一太空漫遊》（2001:A

Space Odyssey）舉辦特別慶祝會時，他們的心情很複雜。在電影中，一台命名為「HAL 9000」的電腦發狂了，也屠殺了太空船的航員。這支一九六八年拍攝的電影也預測，到了一九九二年，將會有能就任何主題與任何人進行流利對話的機器人，而且它還能指揮太空船。不幸地，最先進的機器人的聰明程度，連一隻昆蟲都沒得比，事實顯然讓人深感挫折。

一九九七年IBM的機器人「深藍」（Deep Blue）在關鍵性的比賽中擊敗了世界棋王蓋瑞‧卡斯帕洛夫（Garry Kasparov），達成了歷史性的突破。「深藍」是一個工程奇蹟，每秒運算一百一十億次。不過，它並沒有打開人工智能研究的大水閘，啟動一個新時代，結果恰恰相反。它只是凸顯出人工智能原始狀態。很多人反思的結果，都認為「深藍」無法思考。它的棋藝的確高超，但在IQ測驗中卻可能抱鴨蛋。在這個勝利之後，出面對媒體發表所有的談話的，卻是輸家卡斯帕洛夫，因為「深藍」完全無法談話。人工智能研究人員，很不情願地開始領會一個事實：強大的電腦的運算力並不等同於智能。人工智能學者理查‧黑克勒（Richard Heckler）說：「今天，你可以花四十九美元買到可以打敗世界冠軍的西洋棋程式，但沒有人會說它們有智能。」

隨著摩爾定律每十八個月推出新一代電腦，過去悲觀的一代，遲早會被漸漸地遺忘，聰明又熱情的新一代將取而代之，在一度冬眠的領域重新創造新生的樂觀和活力。在最後一期人工智能寒冬降臨三十年後的今天，電腦已經夠進步，足以讓新一代的人工智能研究人員，再對未來提出充滿希望的預測。它的支持者說，人工智能的時代終於來臨了。這次，是真的。事不過三，第三次嘗試應是一個幸運符。但如果他們說對了，那麼人類會很快地被淘汰嗎？

大腦是數位電腦嗎？

如同數學家現在所認識到的，根本的問題在於，他們在五十年前造成一個關鍵性的錯誤，以為大腦可與大型數位電腦做類比。但令人懊喪的是，大腦顯然並非如此。大腦沒有典型電腦所含有的奔騰（Pentium）晶片、視窗作業系統、應用軟體、中央處理器（CPU）、程式以及子程式。事實上，數位電腦的結構與大腦的構造完全不同。大腦有點像是學習機器，一個神經元的集合體，每學習一件作業，它就立刻重新連結。

（個人電腦則完全無法學習。你的電腦，今天只會跟昨天一樣笨。）

所以，我們至少可用兩種模式來研究大腦。第一種，傳統的由上而下的模式，將機器人視同數位電腦，從一開始就將所有的智能規則寫入程式。至於數位電腦，則可以切割成某種被稱為「圖靈機」（Turing machine）的裝置——那是偉大的英國數學家艾倫·圖靈（Alan Turing）介紹的一種假設性的裝置。圖靈機包含三個基本部分：輸入、消化資料的中央處理器以及輸出。所有的數位電腦都以這個簡單模式為基礎。這種方式的目標是將所有的智能規則編碼裝進一片光碟中。將這個光碟片塞進電腦，它就突然活了過來，變得有智能。所以，這個神祕的光碟包含創造智能機器所需的所有軟體。

不過，我們的大腦完全沒有作業程式或軟體。它比較像是一個「神經網絡」，一堆雜亂的、不斷重新互相連結的神經元的複合體。

神經網絡遵循「海柏學習法則」（Hebb’s rule）：每作一次正確決定，那些神經通路就獲得增強。只要在每次它成功地執行一個工作後，改變某些神經元之間的連結強度，此一增強就已完成。（海柏學習法則能用這個老掉牙的問題來表達：音樂家要如何取得前往卡內基音樂廳演奏的邀請？答案：練習、練習、再練習。對神經網絡來說，練習可以達到完美。海柏學習法則也可以解釋，壞習慣之所以難以打破，因為這個壞習慣的神經通路已經根深蒂固。）

神經網絡植基於「由下而上」的模式。它不是被所有的智能規則填滿的，而是以嬰兒學習的方法得到，跌跌撞撞，遇到很多事物，在經驗中學習。神經網絡並未被灌滿程式，而是用老舊的方法，通過艱苦的生活磨練來學習。

神經網絡的結構與數位電腦完全不同。如果你把數位電腦中央處理器中的一個電晶體取出，電腦就會失靈。不過，如果你取出大腦中的某一部分，它仍然可以用其他部分取代失去的部分，繼續運作。還有，要具體指出數位電腦「思考」的正確位置是有可能的：就是中央處理器。但是，人類大腦的掃描明確顯示，思想活動遍及大腦的大部分。不同部門以精確的次序亮起，思想彷彿乒乓球在到處跳動。

數位電腦能夠以接近光速運算。相對的，人類大腦速度之慢，令人難以置信。神經衝動以極為緩慢的速度移動（約每小時二百英里）。但是大

腦的彌補作用遠遠超過需要，因為它進行大量平行處理。也就是說，它有一千億個神經元同時在運作，每一個只執行一小部分的運算，每一個神經元又與其他一萬個神經元相連。在某一比賽中，單一超快的處理器，被超慢的平行處理器遠遠拋在後面。（這使我們想起一個古老的趣味謎語：如果一隻貓一分鐘可以吃一隻老鼠，那麼一百萬隻貓要吃一百萬隻老鼠需要多久？答案：一分鐘。）

還有，大腦並非數位。晶體是以閘門的開關代表零與一。神經元也是數位化（可以工作或不工作），但它們也可以類比化，既傳送連續訊號，也傳送斷續訊號。

機器人的兩個問題

僅僅舉出電腦的兩個較引人注目的限制（相較於人類大腦），我們就可以領會到，為什麼電腦無法達成人腦不費吹灰之力就能達成的兩項關鍵性工作：模式辨識（pattern recognition）和常識判斷力。這兩個問題使過去半世紀的努力無解。這是為什麼我們沒有機器女僕、男管家和祕書的主要理由。

第一個問題是模式辨識。機器人的視力遠遠超過人類，但他們無法了解看到的是什麼。當一個機器人走進室內，它將影像轉換成一堆小點。透過處理這些小點，它可以辨認出線、圓圈、方塊和三角形的集合。然後機器人嘗試去為這堆小點與儲存在記憶體中的物體一對一配對——這種工作也稱得上冗長乏味，連電腦也不例外。經過數小時計算之後，機器人也許能將這些線條和椅子、桌子及人配對。相對的，當我們走進一個房間，不到一秒鐘，我們就能認識椅子、桌子、書桌和人。事實上，我們的大腦主要就是一個模式辨識的機器。

第二，機器人沒有常識判斷力。雖然它們的聽力比人類好太多，但他們不了解聽到的是什麼。舉例來說，想想下列陳述：

☆孩子喜歡獎賞，而非處罰。

☆線能拉不能推。

☆手杖能推不能拉。

☆動物不能說英語，也無法理解英語。

☆旋轉使人感覺頭暈。

對我們而言，這些陳述只是普通常識，但機器人則不然。沒有任何一條邏輯或程式證明線能拉不能推。我們已經在經驗中學到這些「顯然的」陳述的真相，不是因為它們被程式置入記憶。

由上而下的模式的問題在於，若要模仿人類的思考，光是普通常識就需要太多行的編碼。例如，如果要描寫六歲孩子所知的常識規則，需要花費數億的編碼。卡內基梅隆大學人工智能實驗室前主任漢斯‧莫拉維克（Hans Moravec）嘆口氣說：「到今天，人工智能程式仍無法展示少量的常識——例如，當一個醫療診斷程式去處理一台壞掉的自行車時，可能會開出抗生素的處方，因為這個程式裡沒有辦法分辨人、疾病或自行車的概念。」

不過，某些科學家堅信，只要靠蠻力，就能掌握常識。他們覺得，一個新的曼哈頓計畫（與製造原子彈的計畫同名），一定可以解決常識問題。這個打算創造「思想百科全書」的蠻幹計畫，被稱為CYC，從一九八四年開始。這個計畫打算將常識的祕密編成代碼寫進單一程式，它將是人工智能成就的冠冕。不過，經過數十年的辛勤工作，這個CYC計畫無法實現目標。

CYC計畫的目標很簡單：「在二○○七年以前，掌握一億件事物，約等於一個典型的人在二○○七年對世界所知的全部。」但那個截止期限，以及在此之前設定的好幾個期限，都已經跳票。每一個CYC工程師所設下的里程碑，都已成過去式，但是沒有一個科學家曾對掌控智能的本質有所進展。

人與機器對決

我曾有機會在一個機智競賽中，與麻省理工學院托馬叟‧波吉歐（Tomaso Poggio）製造的機器人對決。雖然機器人無法像我們一樣辨識簡單的模式，波吉歐卻能創造出一個程式，可以在某一特殊領域運算得跟人一樣快。這個領域是所謂的「即時辨識」，就算事先並沒有察覺某一物體，依然能即刻辨認它，這是人類擁有的神奇能力。（即時辨識

對我們的進化很重要，因為我們的祖先必須在一瞬間，斷定是否有老虎潛伏於灌木中，甚至在牠們還沒完全看清楚以前。）這是第一次，機器人在一個特定視覺辨識測驗中，得分持續地高於人類。

我與機器人之間的比賽很簡單。首先，我坐在椅子上，目視一個普通的電腦螢幕。然後，一個圖片在螢幕中閃現不到一秒鐘，而我必須儘快按下兩個按鍵之一，表示我有沒有在途中發現一個動物。我必須儘快做決定，甚至在我有機會完全消化這張圖之前。電腦也會針對相同的圖片做出決定。

結果實在夠糗，經過許多快速測驗之後，機器和我的表現幾乎一樣好。但有好幾次機器得分明顯比我高，把我遠遠拋在後面。我被機器打敗了。（當我被告知，電腦答對的次數占百分之八十二，人類平均分數只有百分之八十時，我內心略感安慰。）

波吉歐的機器的關鍵是它複製了大自然的經驗。許多科學家都知道這個陳述為真：「輪子既然已經發明，為何不複製它？」例如，通常當一個機器人在看圖畫時，會試圖將它分解為許多系列的線、圓圈、方塊和其他幾何圖形。但波吉歐的程式不同。

當我們看到一個圖畫時，我們先看到不同物體的輪廓，然後看到每一個物體裡面的特徵，然後才是內部的差異等等。所以，我們將影像拆解成許多層。當電腦處理了圖像的一層以後，就將它與下一層整合，以下各層也一樣。用這種方法，一步步，一層層，它模仿了我們的大腦劃分等級處理影像的方法。（波吉歐的程式沒有我們認為是理所當然的辨識所有模式的本事，例如物體的3D影像、由不同角度辨識千萬種物體等等，但它確實代表模式辨識的主要里程碑。）

後來，我有機會看到「由上而下」和「由下而上」兩種模式的運作。我先飛到史丹佛大學人工智能中心，在那裡我遇見了史丹佛人工智能機器人（Stanford artificial intelligence robot,STAIR）。STAIR用的是「由上而下」模式，它有四英尺高，有一個巨大的機械手臂，可以旋轉，可以從桌子上抓走東西。STAIR也可在辦公室或家中移動。這個機器人有一個3D的照相機，可以先指定一個物體，將該物體的3D影像存進電腦，然後電腦再指引機械手臂去抓物體。自從一九六○年代以來，機器人就能像這樣抓住物體，我們在底特律的汽車工廠可以看到他們。

但外表會欺騙人。STAIR可以做更多的事。它不像底特律的機器人，不僅僅按照事先寫好的劇本演出。它可以自行運作。如果你要求它撿起一個橘子，它能分析桌上所有的物體，將它們與已經儲存在記憶體中的數千張影像做比對，然後認出橘子，將它拿起來。它也可以透過抓住物體，轉動它們使得指認更正確。

為了測試它的能力，我隨意堆放一些東西在桌上。我說出一個特定物體的名稱，然後觀看結果。我看到STAIR正確地分析剛放上去的東西，然後伸手去抓取正確的東西。最終目標，是要讓STAIR巡遊於家中和辦公室環境，拿起不同的東西和工具並與其互動，甚至能以簡單的言語與人對話。如此，它將可做辦公室中任何工友能做的事。STAIR是「由上而下」模式的一個例子：所有的東西都在開始的時候就以程式存入。（雖然STAIR能從不同角度辨識物體，但它能辨識的物體數量仍然有限。如果讓它走出室外，讓它隨機辨識物體，它就會癱瘓。）



圖說：不同類型的機器人：LAGR（上），STAIR（下左），阿西莫機器人（下右）。儘管大量增強電腦運算力，這些機器人的智力只與蟑螂同級。（上圖：Courtesy of Professor Yann LeCun；下左：Courtesy of Professor Ashutosh Saxena；下右：Jason Kempin/WireImage）

不久，我有機會訪問紐約大學，數學研究所的電腦學家嚴恩‧樂庫（Yann LeCun）在那兒實驗一個截然不同的設計：地面學習機器人（learning applied to ground robots,LAGR）。LAGR是「由下而上」模式的一個例子：任何事物它都必須嘗試錯誤，從頭學起。它大小與高爾夫球車相當，有兩個立體相機可以掃描地面景物，在前進的路上辨識物

體。然後它繞過這些物體，小心不碰到它們，每次通過時都學習到一些。它裝有全球定位系統，也有兩個紅外線感應器，可以偵測到前面的物體。它有三個強力的奔騰晶片，並與一個十億位元的乙太（Ethernet）網路相連。我們到附近的公園，在那兒LAGR可以繞過放在小徑上的障礙物，進行漫遊。每次它通過同樣的路，它都能更快地避開障礙。

LAGR與STAIR的一個重要的不同，在於LAGR是特別為學習而設計。每一次碰到東西，它就繞過它，並學習在下一次避開它。STAIR有成千上萬個影像儲存於記憶體中，而LAGR的記憶體中幾乎沒有任何影像，取而代之的是創立了一個它所遇到的障礙的心理地圖，並且在每次通過時不斷地修正它。LAGR與無人汽車的設計不同，無人汽車事先做了程式設定，並循著預先由GPS設好的路線前進；而LAGR則是走自己的路，沒有任何來自人類的指令。你只要告訴它去哪裡，它就出發了。最後，像這樣的機器人將會出現在火星、戰場和我們的家中。

一方面，我對這些研究者的熱情和精力印象深刻。在他們心中，他們相信他們正在為人工智能奠定基礎，而他們的工作，有一天會對社會產生我們還沒完全了解的影響。但如眼光放遠，我也可以察覺，他們還有多遠的路要走。即使是蟑螂也能辨識物體，並學習繞過它們。我們仍處於一個連自然所孕育的低階生物，都比我們的多數智能機器人聰明的階段。

世紀初期（現在—二○三○）

專家系統

今天，許多家庭有簡單的機器人，可以為地毯吸塵。另外還有在夜間巡邏的機器人警衛、機器人導遊和工廠裡的機器工人。在二○○六年，估計約有九十五萬個工業機器人，另有三百五十四萬個服務機器人，在家庭和建築物中工作。但在未來的數十年，機器人領域將會在數個方向興盛起來。但這些機器人的長像不會與科幻小說中的一樣。

我們可以感受到最大的影響，也許在所謂專家系統。它是將人類智慧和經驗編碼的軟體。如同我們上一章所見，有一天，我們可能對著牆壁的螢幕與網路對話，並且與機器醫生或機器律師的友善面孔對話。

這個領域被稱為啟發法（heuristics），也就是遵循一個正式的、以規則為基礎的系統。當我們想要規劃一個假期時，我們跟牆上螢幕中的臉孔說話，告訴它想要有怎樣的假期：幾天、去哪裡、哪個旅館、什麼價格。這個專家系統將會從我們過去的經驗知道我們的偏好，然後跟旅館和航空公司等等聯繫，然後給我們最佳選擇。但是我們不能用聊天般或說閒話的方式去說，而要用相當正式、有一定格式的語言，它才聽得懂。這種系統，可以迅速執行任何數量的日常事務。你只要給它命令，它就會跟飯店定位、尋找商店位置、代買日用品、外賣食物和預定機票等等。

由於過去數十年的啟發法的進展，才會有現在的一些比較簡單的搜尋引擎。但它們仍處於原始狀態。顯然，每個人都知道打交道的對象是機器而非人類。不過，未來的機器人將極為精緻，看起來更像人，以細緻無縫的作業為你服務。

也許，最實用的應用將是醫療照顧。例如，現在如果你覺得不舒服，你可能要在急診室等好幾小時才看得到醫生。未來，你可能直接到牆面螢幕，跟機器機醫生交談。你將可以改變打開螢幕以後所見的機器醫生的面孔甚至個性。這個在牆面螢幕所見的友善面孔，會問一組簡單的問題：你的感覺如何？哪裡不舒服？甚麼時候開始痛？每次不舒服間隔多久？

每次，你都會從一組簡單的答案選擇回應。你不需打字，只需說話就能回答。

你回答以後，接著就會立即出現下一組問題。回答完這類問題以後，機器醫生會依據全世界醫生的最佳經驗，為你做出診斷。機器醫生也會分析來自浴室、衣服、傢具的資料。那些地方都會透過DNA晶片持續監控你的健康。它也可能要求你用手提磁振造影掃描器檢查你的身體，然後將影像送由超級電腦分析。（這種探索式計畫的某些較原始版本已經存在，例如網路醫療，但它們還不夠精緻，也還沒有完全的探索能力。）

以此方式，多數前往醫院看醫生的行動都可以省略，大大降低醫療系統的負荷。如果問題嚴重，機器醫生會建議你去醫院，由人類醫生提供密集的檢查。但即使在醫院，你還是會看到人工智能程式以機器護士（像阿西莫）的形式出現。這些機器護士並非真正聰明，但能在不同的房間

移動，提供適當的醫藥給病人，滿足他們的其他需要。這些機器人可以在地板上的軌道移動，或者像阿西莫一樣獨立行動。

現在有一個機器護士叫做RP-6行動機器人。它被部署在加州大學洛杉磯分校醫學中心等處。它基本上是座落於移動式電腦（在滾軸上移動）上的一個電視螢幕。在電視螢幕中，你看到一個真實醫生（可能在好幾里外）的影像。機器人上面有一個攝影機，可以讓醫生看到機器人看到的景象。這裡也有一個麥克風，讓醫生可以跟病人說話。醫生可以透過搖桿控制機器人、與病人互動、監控藥物等等。由於美國每年有五百萬個病人被送往加護病房，但只有六千個合格醫師可以處理嚴重病患，像這種機器人可以幫忙緩和緊急照護危機，讓一個醫生到許多病人那裡。未來，這樣的機器人會更加自主，可以自行走訪病人，並與他們互動。

日本是這種科技的世界領導者之一。日本為機器人花了很多錢，以便舒緩即將來臨的醫療危機。回顧過去，日本之所以成為世界上的機器人大國，並不令人意外。原因如下：第一，日本傳統神道教相信無生命的物體中有精靈存在，連機械都一樣。在西方，孩子看到機器人，可能會害怕尖叫，特別是在看了許多橫衝直撞的殺人機器電影之後。但是，對日本孩子而言，機器人被認為是友善的精靈，好玩又有助力。在日本，當你進入百貨公司時，看見機器接待員跟你打招呼是很平常的事。事實上，全世界有百分之三十的商業用機器人在日本。

第二，日本正面對人口的夢魘。日本有最快速老化的人口。出生率降低至令人驚訝的狀況，每個家庭平均只有一‧二個孩子，而移民數字則微不足道。某些人口專家說，我們正看到火車失事的慢鏡頭：在未來數年，一輛人口火車（老化人口和低出生率）將與另一輛（低移民率）對撞——相同的火車事故，以後也會在歐洲發生。這個現象在醫療領域特別嚴峻，因而那個領域中，類似阿西莫的護士可能很有用。像阿西莫機器人將會很適合醫院工作，例如分發藥單、管理藥物、和每天二十四小時看護病人。

世紀中期（二○三○—二○七○）

模組機器人

到了世紀中期，我們的世界裡可能充滿機器人，但我們可能不會注意到

他們的存在。那是因為多數機器人可能不會有人類的樣子。它們可能隱藏起來，偽裝成蛇、昆蟲和蜘蛛等，擔任不愉快卻重要的任務。它們將是可以隨著需要變形的模組機器人。

我有機會與模組機器人先驅之一，南加州大學的沈為民（Wei-min Shen）會面。他的構想是創造小方塊模組（cubical modules），可以像樂高方塊一般互相替代，也可按照自己的意願重組。因為它們可以改變形狀、圖樣和功能，他稱之為「變形機器人」（polymorphic robots）。在他的實驗室中，我可以立刻看到他的研究方法與史丹佛大學及麻省理工學院的方法都不同。表面上，那兩個實驗室都如同孩子的夢幻玩具間，到處都有會走路和談話的機器人。當我訪問史丹佛和麻省理工的人工智能實驗室時，我看見各種不同的機器人「玩具」，身上有晶片，也有一些智能。工作台上有很多飛機、直升機、卡車和昆蟲形狀有晶片在內的機器人，這些都能自己行動。每一個機器人都是自成體系的單位。

不過，一旦進入南加大實驗室，所見大異其趣。你看到許多像盒子一般的模組，每一個大約兩英吋立方，可以連結或分開，容許你創造出許多不同的像是動物的產物。你可以創造出以線形滑行的蛇。或者像鐵環滾動的圓圈。你還可以扭動這些方塊或用一個Y形的接合器將他們鉤在一起，創造出完全不同的新裝置，代表章魚、蜘蛛、狗或貓。你可以想像一個聰明的樂高組合，每一塊都有智能，凡是想像得出來的東西都有能力自行組成。

若要通過障礙，這點非常有用。如果一個蜘蛛形的機器人在水溝內爬行，碰到一面牆時，它會先找到一個小洞，然後自行分解。每一個小方塊將能自行穿過這個洞，然後這些小方塊會在牆的另外一邊重新組合起來。如此，這些模組機器人將是幾乎無可阻擋，有能力順利通過多數障礙。

這些模組機器人，對於修補我們日益腐朽的基礎建設可能非常重要。例如，在二○○七年，明尼亞波里斯市的密西西比河大橋，可能是因為已經老化、負荷過重和設計錯誤而崩毀，十三人死亡，一百四十五人受傷。全美國可能還有數百個意外事件隨時會發生，只因所需經費太多，以致無法監控每一個腐朽中的橋樑，並加以整修。這正是模組機器人可以挺身救援的地方。它們可以悄悄地檢查橋樑、公路、隧道、管線和發電廠，必要時並加以修理。（例如，通往曼哈頓下城的那些橋，由於腐

蝕和缺少整修，已經損傷嚴重。有一個工人還在那裡發現了一九五○年代最後一次油漆時遺留的可樂瓶。事實上，老舊的曼哈頓橋的某一段，最近還因瀕臨崩潰，不得不關閉進行修理。）

機器外科醫生和廚師

機器人可能擔任外科醫師、廚師和樂師。例如，外科醫師的一大限制就是人類手部的靈巧和正確性。外科醫生和所有的人一樣，工作許多小時以後會疲勞，效率會降低，手指開始顫抖。機器人可以解決這個問題。

例如，傳統的外科醫生進行心血管繞道手術時，必須先進行全身麻醉，然後在胸膛中央打開一英尺長的切口。打開胸腔增加了感染的機會，也拉長了復原時間，在治療過程中造成劇強烈痛苦和不舒服，最後留下難看的疤痕。但是，達文西機器人（da Vinci robot）系統可以解決大部分問題。這個機器人有四隻手臂，其中一隻操作照相機，另外三隻負責精確的手術。它不需在胸膛切開長長的缺口，只需在身體側面打開幾個小切口。在歐洲和南、北美洲，共有八百個醫院使用這個系統。僅僅在二○○六年，這種機器人就已執行了四萬八千個手術。手術也可以透過網路遙控進行，所以在大城市的世界級外科醫生，可以為遠在另一個大陸上孤立農村的病人動手術。

未來，較先進的機器人型號，將能透過操作微型解剖刀、鉗子和針，在微血管、神經纖維、器官組織上動手術；而現在這些都還不可能。事實上，在未來，外科醫師切開皮膚的事將極為罕見。非侵入式手術將成為基本規範。

內視鏡（置入體內能夠照明並切除組織的長管）將會比線還要細。小於小數點的微機器將會做很多機械性工作。在原始版本的《星艦迷航記》中有一個插曲，麥考伊醫官（Doctor McCoy）對於二十世紀的醫生必須切開皮膚的事深感噁心。這樣的一天成為事實已經不遠。

未來的醫學院學生將會學習切割人體的3D虛擬影像，手的每一個動作都由另一個房間的一個機器人再現。

日本人擅長製造能與人類做社會互動的機器人。名古屋有機器廚師，能在數分鐘內為你做出標準速食晚餐。這個機器是由Aisei工業機器人公司

所製作，它會在一分四十秒內做出麵食，在忙碌的用餐時間可以供應八十碗。這個機器人廚師外貌很像底特律汽車裝配線的機器人，有兩隻動作與次序都由程式精確設定的長手臂。不過他們不在工廠裡裝螺絲釘或焊接鋼鐵，而是以機器手指從一排碗裡，抓取調味料、肉、麵粉、醬料、香料等材料。這個機器手臂將它們混合並組合成為三明治、沙拉或湯。Aisei廚師的外觀像個機器人，它只有由廚房櫃台伸出的兩隻大手。但是其他規劃中的模型開始比較有人的模樣。

也是在日本，豐田發明一種會拉小提琴的機器人，水準幾可媲美任何專業人士。它的外貌類似阿西莫，例外的是它能抓住小提琴，隨著音樂搖擺，然後專注於演奏複雜的小提琴樂曲。樂聲真實得令人難以置信，機器人還能像音樂大師擺出堂皇的姿勢。雖然音樂尚未達到演奏會水準，但已足以取悅聽眾。當然，上一世紀，我們已經有機械鋼琴，可以按照刻在旋轉的碟子上的音調演奏。就如同這些鋼琴機器，這個豐田機器也是以程式設定。不同的是，豐田機器經過細心設計，能以最接近真實的方式，模仿人類小提琴師的指法和姿勢。

還有，日本早稻田大學的科學家也做了一個機器人長笛家。這個機器人胸部中空，像人的肺，可以對著一支真正的長笛吹氣。它可以演奏相當複雜的旋律，如《大黃蜂飛行》（The Flight of the Bumblebee）。我們必須強調，這些機器人無法創作自己的音樂，但它們演奏音樂的能力已可與人類匹敵。

機器人廚師和機器人樂師都經過細心設計程式。他們無法自主。雖然比起老式的鋼琴機器已較為精緻，但它們仍以相同的原理運作。真正的機器僕人和機器管家，仍在遙遠的未來。但機器廚師、機器小提琴師和長笛樂師的後代，可能有一天會進入我們的生活，執行某種我們認為是專屬人類的基本功能。

感性的機器人

到了世紀中期，感性機器人的時代，可能已經是完全綻放的花朵了。

在過去，許多作家想像出渴望變成人類並有情緒的機器人。在《木偶奇遇記》（Pinocchio）中，一個木偶希望成為真正的男孩。在《綠野仙蹤》（Wizard of Oz）裡，鐵皮人希望有一顆心。而在《星艦迷航記：

下一代》（Star Trek:The Next Generation）裡，人形機器人「百科少校」（Data），試圖透過說笑話和猜出什麼會讓人笑來控制情緒。事實上，在科幻小說中，有一個一再重複出現的主題——機器雖然越來越聰明，但他們總是無法掌握情緒的本質。有些科幻小說家聲稱，機器人也許有一天會比人聰明，但它們仍沒辦法哭泣。

事實上，那可能不是真的。科學家現在了解情緒的真正性質。第一，情緒告訴我們，什麼對我們有益，什麼對我們有害。世界上大多數事物，既非對我們有害，也不會很有用。當我們經驗「喜歡」的情緒時，我們是在學習確認環境中對我們有益的細微事物。

事實上，我們的每一種情緒（恨、妒忌、恐懼、愛等）都是經過數百萬年演化形成，以便在充滿敵意的世界保護我們，免於危險，並幫我們繁衍後代。每一種情緒都在幫忙基因繁殖到下一代。

對南加州大學神經學家安東尼歐‧達馬西歐（Antonio Damasio）而言，情緒顯然在演化中扮演著關鍵性的角色。他曾對腦部受傷或有病的病人加以分析。有一些病人大腦中的思考部分（大腦皮層）和情緒中心（位於大腦中心深處，像個杏仁核）的聯繫被切斷。這些人除了情緒的表達有困難，其他功能一切正常。

有一個問題立刻明顯出現：他們無法做選擇。購物成為夢魘，因為所有的東西，不論貴或便宜，俗艷或高雅，對他們而言價值都相同。設定約會幾乎不可能，因為未來的每一天都相同。他說，他們似乎「知道，卻無法感覺到」。

換句話說，情緒的主要目的之一，就是給我們價值，然後我們才能決定什麼是重要的，什麼是昂貴的，什麼是美麗的以及什麼是珍貴的。沒有情緒，所有的事物等值，我們將因無法做決定而痲痹，因為不論作任何決定，重要性都相同。所以科學家現在開始了解，情緒乃是智能的必要因素，而非可有可無的奢侈品。

例如，當我們觀賞《星艦迷航記》時，看到史巴克（Spock）和「百科少校」像是不帶情緒地執行工作，現在你馬上會了解錯誤所在。史巴克和「百科少校」每一件事都顯露了情緒：他們已經做了一系列的價值判斷。他們決定擔任幹部很重要，因為那意味著執行某些任務的艱難，聯邦目標的高貴，以及人類生命的珍貴等等。因此，要找到一個不帶情緒

的幹部，不過是個錯覺。

有情緒的機器人可能關係著生與死。未來，科學家將能創造出救援機器人——被送至火災、地震、爆炸現場的機器人。它們必須對救誰、救什麼、先做什麼事等等，做出數千個價值判斷。環視周邊的破壞損傷之後，它們必須對許多等待完成的任務排出優先順序。

如果你回顧人類大腦的演化，情緒也是必要的。如果你觀察大腦的解剖特徵，你會注意到它們可以區分為三大類。

首先，在頭殼深處，你有跟大多數爬蟲類相同的爬蟲類腦（腦幹）。最原始的生活功能，如平衡、攻擊性、地盤性及尋找食物等，都由這部分的腦控制。（有時候，你看到一隻蛇，蛇也跟你對看，你覺得毛骨悚然。你不免好奇，蛇在想什麼？如果這個學說是對的，那麼蛇並沒想很多，除了你是不是牠的午餐。）

接著，我們往上看，發現腦部向頭顱前方擴充。在腦幹的外緣一層，我們在腦部中央發現猴子腦或邊緣系統。它的組成部分包括參與情緒處理的杏仁核。集體生活的動物會有特別充分發展的邊緣系統。團體出獵的社會動物需要較高級的腦力，專用於了解整個群體的規則。因為在荒野的成功有賴於與同伴的合作。但是因為這些動物無法交談，牠們必須透過肢體語言、咕噥聲、鳴叫聲以及姿勢來溝通牠們的情緒狀態。

最後，我們有前額和外層的腦，即大腦皮層，這一層界定人性，也控制理性思考。當其他動物被本能和遺傳所支配時，人類用大腦皮質思考解決事情。

如果這種演化過程是正確的，那也表示在創造獨立自主的機器人時，情緒將扮演一個不可或缺的角色。目前為止，被創造出來的機器人都只是模仿爬蟲類的腦。它們能走路、搜索周邊、找到物體，除此以外也就不多了。至於社會動物，比起只有爬蟲類腦的動物則聰明多了。有情緒，才能使動物社會化，能夠操控團體的規則。所以科學家在能夠模仿邊緣系統和大腦皮層以前，還有很長的路要走。

麻省理工學院的辛西亞·布雷季爾（Cythia Breazeal）為了對付這個問題，事實上已經創造了一個特別設計的機器人。這個叫做KISMET的機器人，臉部是一個淘氣的小精靈。表面上，它顯得活生生的，以臉部動

作顯示情緒回應你。KISMET可以透過改變面部表情來複製許多情緒。事實上，婦女和這個孩子氣的機器人互動時，往往以母親對嬰兒或孩子說話的「媽媽語」跟它說話。雖然像KISMET這樣的機器人是設計來模擬情緒，但是科學家不會誤以為機器人真的感受到情緒。在某種意義上，它就像是錄音帶不知道自己在說些什麼一樣。只是，這個機器人不是在播放聲音，而是在扮演臉部表情罷了。但KISMET的突破在於，它不需要編寫很多程式，就能創造出一個能夠模仿人的情緒，並以此引發出如人類般反應的機器人。

這些有表情的機器人將會進入人類的家裡。它們不會成為我們的密友、祕書或女僕，卻能依照啟發法建立以規則為基礎的程式。到了世紀中期，它們可能跟貓或狗一樣從聰明。如同寵物一般，它們會表現出與主人同心的表情，因而較不容易被遺棄。你將不能以口語與它們交談，但它們將聽得懂程式儲存的指令（也許有好幾百個）。如果你叫它們做某種尚未預先儲存與記憶中的事時（如「去放風箏」），它們會僅僅給你一個好奇或困惑的表情。（如果到了世紀中期，機器貓狗能模仿貓狗的全部反應，與真實的動物行為難以辨別時，那麼問題就來了：這些機器動物能真的有感覺，或者與普通的貓狗一樣聰明嗎？）

索尼公司在製造AIBO智能機器狗時，以這些有感情的狗做實驗。雖然有點原始粗糙，但它是第一個能夠真正對主人做情緒反應的狗。例如，如果你拍AIBO的背，它會立刻低沉地發出舒服的叫聲。它會走路，對聲音指示做反應，甚至進行某種程度的學習。AIBO無法學習新的情緒和情緒反應。（由於財務原因，它於二○○五年停產。但它已經招徠忠實的追隨者，為它的電腦軟體升級，使AIBO可以有更多本事。）未來，對兒童有忠誠度的機器寵物將很平常。

雖然，這些機器寵物儲存的感情內涵會很豐富，也會對兒童忠心耿耿，但它們不會感受到真正的感情。

大腦逆向工程

大約在世紀中期，我們應當能達成人工智能的下一個里程碑：人類大腦的逆向工程。科學家受挫於無法創造出由矽晶片和鋼鐵造成的機器人，於是開始嘗試相反的方法：以神經元為單位，逐步拆解大腦——如同技

工將螺絲釘一個一個拆解——然後在超級電腦中模擬這些神經元。這些科學家有系統地按照動物演化的階層，從貓狗開始，向上嘗試模擬動物神經元的啟動。這是一個明確的目標，到了世紀中期，將成為可能。

麻省理工學院的佛瑞德‧哈普古德（Fred Hapgood）曾在一篇文章中說：「發現大腦如何工作——就像我們知道引擎如何發揮作用一般，百分之百精確的了解——將會改寫圖書館中的每一本書與文字。」

進行大腦逆轉工程的第一步，就是了解它的基本結構。即使是一個簡單的任務，也已經是一個漫長而又痛苦的歷程。回顧過去，大腦的不同部分已經在屍體解剖過程中確認，但人們對於它們的功能卻找不到線索。當科學家分析腦傷病人的大腦，發現大腦某部分的損傷，會產生相應的行為改變時，情況因而逐漸改變。表現出特定的行為改變的中風患者與腦部受傷或生病的人，可以和大腦中某特定部位的傷害相配對。

最精彩的例子發生於一八四八年的佛蒙特州。當火藥意外爆炸時，發生了改變歷史的意外，一根三英尺八英吋長的鐵條穿透鐵路工頭菲尼亞斯‧蓋吉（Phineas Gage）的頭顱。鐵條由臉的一側刺入，粉碎了下顎，穿過大腦，由頭頂穿出。雖然他全部額葉（frontal lobes）或兩者之一被毀，但他竟奇蹟似地能在可怕的意外事故中倖存。剛開始時，為他治療的醫生，很難相信任何人可以在這樣的意外中存活。他陷入昏迷數週，但後來奇蹟似地復原了。他甚至繼續多活了十二年，回到工作崗位，也外出旅行。他於一九六○年去世後，醫生小心地保存他的顱骨和鐵條。此後它們被密集地進行研究。現代科技（應用斷層掃描）已經重新建立了此一事故的細節。

此一事故永遠地改變了有關身心問題的觀念。以前，即使是科學界也相信心靈與肉體是分開的實體。人們記述說，某種獨立於大腦之外的「生命力量」，賦予身體活力。但廣泛流傳的報告指出，蓋吉的人格在事故之後，有了重大的轉變。某些描述聲稱，原本外向、討人喜歡的蓋吉，在事故之後變得愛罵人、充滿敵意。這些報告的影響，增強了「大腦的特定部位控制著不同的行為，因而心靈與肉體密不可分」的想法。

一九三○年，另一個突破發生了。神經學家威爾德‧潘菲德（Wilder Penfield）等人注意到，在為癲癇病人動腦部手術時，只要用電極碰到腦部的某一部分，身體某一特定部位就會受到刺激。依此類推，他可以

建構出一個「腦皮層的某一部位控制身體的某一部位」的簡略輪廓。因此，我們可以重新描繪人類腦部，列出腦部的哪一個部位控制哪一個器官。結果是一個看來很像小矮人的怪異人體圖像（指尖、嘴唇和舌頭都很巨大，身體卻很小），呈現在腦部的外表上。

到了不久以前，磁振造影掃描為我們揭露了更多大腦思考的圖像，但它們無法追蹤思想的特定路徑——那個路徑可能只涉及數千個神經元。一個結合光學與遺傳學的新領域，稱為「光遺傳學」（optogenetics），可以揭露動物的特定神經路徑。我們可以拿道路地圖的製作來做類比。磁振造影掃描的結果，像是在決定較大的州際公路和較大的交通流量。而光遺傳學則可以實際確定個別的道路和小徑。一般而言，它甚至容許科學家，有可能透過刺激這些特定的路徑，來控制動物的行為。

這一點又反過來造成幾個勁爆的媒體故事。新聞集合網站「德拉吉報告」（Drudge Report）曾轉載一個聳人聽聞的大消息：「科學家創造了遙控蒼蠅。」這個媒體報導令人聯想到以遙控蒼蠅執行五角大廈不法勾當的遠景。在「今夜脫口秀」中，傑▪李諾（Jay Leno）甚至談到一隻可以遙控的蒼蠅，可以在命令下飛進布希總統口中。雖然這位喜劇演員想像出一個軍事演習日，五角大廈以按鍵指揮的祕密昆蟲部隊的怪誕場景，但實際情形不會那麼誇張。

果蠅的大腦中大約有十五萬個神經元。科學家能夠運用光遺傳學，讓果蠅腦部與某種特定行為相對應的神經元發亮。例如，當兩個特定神經元啟動時，它可以對果蠅發出逃避訊號。於是果蠅自動伸腳、張翅並起飛。科學家有能力繁殖出一個果蠅品種，它們只要見到雷射光就能夠啟動逃避神經元。如果你對著這些果蠅閃動雷射光，每次它都會飛走。

確定腦部結構的影響非常重大。不僅僅可以讓我們慢慢地梳理出某種行為的神經通路，也可以用這種資訊來幫助中風的受害者，和因大腦疾病和受傷而受苦的病人。

牛津大學的葛羅▪米森波克（Gero Miesenbock）和同事，已經能夠以這種方法來確定動物的神經機制。他們不但研究出果蠅逃避反射的通路，也找出有關氣味的反射通路。他們研究了管理蛔蟲尋找食物的神經通路，也研究了老鼠做決定時涉及的神經元。他們發現了果蠅最少只要兩個神經元就能觸動行為，若要老鼠做決定卻要啟動三百個以上神經元。

他們用過的基本工具，是應用能夠控制特定染色的製造的基因，和對光有反應的分子。例如，水母有一種基因可以製造螢光蛋白。還有，有很多種像是視網膜紫質（rhodopsin）一樣的分子，在被光線照射到時，容許離子通過細胞膜，因而產生反應。如此，對這些組織閃動光線可以啟動某些化學反應。這些科學家以染色和對光敏感的化學物質為工具，首度能夠梳理出控制某些特定行為的神經迴路。

所以，雖然喜劇演員喜歡取笑科學家，想要像科學怪人創造出可以按鍵遙控的果蠅，而實情卻是，科學家有史以來第一次，能夠追溯出可以控制某種特定行為的神經通路。

大腦的模型

光遺傳學只是比較素樸的第一步。下一步就是應用最先進的科技，做出整個大腦的真正模型。要解決這個龐大的問題至少得用兩個方法，另外還要加上數十年的苦工。第一個方法是應用超級電腦模擬數十億個神經元（其中每一個又與其他數千個神經元相連）的行為。另一個方法是為每一個神經元作實際定位。

第一個方法（模擬大腦）的關鍵，純粹取決於電腦的運算力。電腦越大越好。依靠蠻力，以及粗糙的理論，也許是打破這個大問題的關鍵。有可能完成此一吃力工作的電腦名叫「藍色基因」（Blue Gene），它是全球最強有力的電腦之一，由IBM建造。

我曾有機會前往加州的勞倫斯利弗摩爾國家實驗室（Lawrence Livermore National Laboratory）參觀，看到這座巨大的電腦。五角大廈的氫彈彈頭的設計，就在這裡進行。它是美國主要的最高機密武器實驗室，建築物在農業區中延伸七百九十英畝。它每年有十二億美元的預算，雇用六千八百人。這是美國核子武器機構的核心。我必須通過層層安全關卡才能進入，因為這是世界上最敏感的武器實驗室之一。

終於，我通過了一系列的檢查，得以進入放置IBM「藍色基因」電腦的建築，這個電腦每秒可以運算驚人的五百兆次。「藍色基因」頗有看頭，它很巨大，占地四分之一英畝，包含一排又一排烏黑發亮的鋼鐵櫃，每一個大約八英尺高，十五英尺長。

在這些鋼鐵櫃中間走動，實在是很特別的經驗。不像好萊塢科幻電影中，電腦有很多閃動的亮光，許多轉動的磁碟，還有閃電爆裂在空中。這些鋼鐵櫃非常安靜，只有少數微光閃動。你知道這個電腦正進行著數以兆計的複雜運算，但是它們工作時，你什麼也看不見，什麼也聽不到。

令我感到有趣的是，「藍色基因」正在實際模擬老鼠大腦的思考過程。老鼠有大約二百萬個神經元，而人類則有一千億個神經元。模擬老鼠的思考過程比你所能想像的還要難，因為每一個神經元又與許多別的神經元相連，交織成密集的神經網。當我走在構成「藍色基因」的一架又一架儀表板之間時，想到這驚人強大的電腦竟只能模擬老鼠的大腦，而且只能模擬幾秒鐘，感到無比錯愕。（這並非表示，「藍色基因」可以模擬老鼠的行為。現在，科學家只能模擬蟑螂的行為。我們只能說，「藍色基因」可以模擬老鼠腦中的神經元活動，而非它的行為。）

事實上，已有數個團體專注於模擬老鼠大腦。在瑞士的洛桑聯邦理工學院，由亨利‧馬克拉姆（Henry Markram）所領導的「藍腦計畫」（Blue Brain Project），就是一個企圖心很強的嘗試。二○○五年，他有機會獲得一個只有一萬六千處理器的「藍色基因」小型版，就開始此一計畫。但僅僅在一年內，他就成功地做出老鼠的大腦新皮質功能柱（neocortical column），這是大腦新皮質的一部分，含有一萬個神經元和一億個連結。那是一個研究的里程碑，因為它意味著，完全以生物學方式，針對每一個神經元，分析大腦中的某一個重要的部分是有可能的。（老鼠大腦包含數以百萬計的功能柱，它們重複結合再一起。所以，只要做出一個功能柱的模型，我們就能了解老鼠的大腦如何運作。）

二○○九年，馬克拉姆樂觀地說：「要製造一個人腦並非不可能，我們可以在十年內辦到。如果我們正確地製造出來，它應當會說話，有智能，也可以有與人類非常類似的行為。」不過，他也小心地下了但書：要達成此一目標，需要一個比現在最強大的電腦還強兩萬倍的超級電腦，還要有現在網際網路全體的五百倍記憶容量。

那麼，達成這個巨大目標的障礙是什麼呢？對他而言很簡單，就是錢。

因為科學基礎已經了解，他覺得只要把鈔票投入問題，他就能成功。他

說：「那不是幾年的問題，而是多少錢的問題……那是社會要不要的問題。如果他們要在十年內解決，他們就會在十年內獲得成功。如果它們的要在一千年內成功，我們可以等待。」

另有一個競爭團隊也在組合歷史上最強大的運算火力，來對付這個難題。這個團隊採用了「藍色基因」的最先進版本「黎明」（Dawn），根據地也在加州的勞倫斯利弗摩爾國家實驗室。「黎明」的外觀蠻嚇人的，它有十四萬七千四百五十六個處理器，記憶容量十五萬個十億位元組。它大約比你桌上的電腦強十萬倍。這個由德哈門扎‧莫德哈（Dharmendra Modha）帶領的團隊，已經數度達陣得分。二○○六年，它可以模擬體型較小的老鼠（mouse）的大腦的百分之四十，二○○七年它可以模擬百分之百較大型的老鼠（rat）的大腦（rat含有五千五百萬個神經元，遠較mouse為多）。

在二○○九年，這個團隊又打破了另一個世界紀錄。它成功地模擬了人類大腦皮層的百分之一，或大致等於一隻貓的大腦皮層，包含十六億個神經元和九兆個連結。不過，模擬的速度很慢，只有大約人類大腦速度的六百分之一。（如果只模擬十億個神經元，就會快很多，速度約達人類大腦速度的八十三分之一。）

莫德哈談到此一重大的成就時，驕傲地說：「這是一個內心的哈伯太空望遠鏡（Hubble Telescope），一個大腦的直線加速器。」由於大腦有一千億個神經元，這些科學家現在已能看到隧道終點的微光。他們覺得人腦的完全模擬已經在視線之內。「這不僅僅是可能的，而且是無可避免的，必然會發生的事。」莫哈德說。

不過，若要模擬出整個大腦，還是有一些很嚴重的問題，特別是在電力和熱力方面。「黎明」電腦吞沒一百萬瓦的電力，產生非常多的熱量，需要六千六百七十五噸重的冷氣機，每分鐘吹送二‧七百萬立方英尺的冷風。若要模擬整個大腦，這些設備的規模還要提高一千倍。

這的確是一種極為巨大的艱困工作。這個假設性的超級電腦將會耗費十億瓦，或者一整個核子電廠的產出。這個超級電腦消耗的能源可以點亮整個城市。為了冷卻它，需要引導整條河流通過它。它也將占據許多塊街區。

神奇的是，人類的大腦只用相對少量的二十瓦。人腦產生的熱量很難引

人注意，但它的表現卻遠遠超過最大的超級電腦。還有，人腦是自然之母在銀河系之中所製作最複雜的物體。由於找不到證據顯示在我們的太陽系中，還有其他的有智慧生命形式，那就表示，你必需向外二十四兆英里（最近恆星的距離），甚至更遠，去找一個與安放在你頭顱中的那個一樣複雜的物體。

我們或許能夠完成大腦的逆向工程，但是唯有在我們有一個龐大的（製造原子彈的）曼哈頓計畫一般的緊急計畫，並且投入無數經費，才可能在十年內實現。不過，依照目前的經濟狀況來看，這事不會很快發生。像「人類基因組計畫」（Human Genome Project）那樣的緊急計畫（經費三十億美元），因為有明顯的健康和科學上的利益，才會獲得美國政府的支持。而大腦逆向工程的利益卻沒那麼緊急，所以只能做久一點。我們只能務實地，採取許多小步驟來達成目標，因而可能還需要數十年，才能完全達成這個歷史性壯舉。

所以，大腦的電腦模擬可能要延續至世紀中期。即使到那時候，還要再花好幾十年來整理消化來自超大計畫堆積如山的資料，才能製造出與人腦相應的模型。如果沒有適當的方法來理出頭緒，並除去不相干的訊號，我們將只會被資料淹沒。

解析大腦

那麼，第二種方法（指認大腦中每一個神經元的精確位置）又如何呢？

這也是一個無比艱難的任務，也可能需要數十年辛勤的研究。這些科學家捨去運用像「藍色基因」那樣的超級電腦，改用切割成小片和小塊的方法。從解剖果蠅的腦部開始，將它切割成難以想像的、不超過五十奈米寬的薄片（寬度不超過一百五十個原子）。切割出來的小片有數百萬。一個電子掃描顯微鏡以每秒接近十億像素的速度，為每一切片攝影。電子顯微鏡吐出的資料數量大得嚇人，大約一千兆位元。僅僅一隻果蠅的腦部資料，已可填滿整個儲藏室。處理這些資料，以冗長程序重建每一個神經元之間的立體3D連結，要花費大約五年時間。如果要獲得更加精確的蠅類腦部圖像，還需為更多蠅類腦部做切片。

此一領域的領導人物之一、霍華德休斯醫學研究所（Howard Hughes Medical Institute）的傑里·魯賓（Gerry Rubin）綜合考慮各方條件後認

為，完整的果蠅腦部圖像將需要二十年。他下結論說：「等我們解決了這個問題，我想我們已經在了解人類心智的路上走了五分之一。」魯賓明白他面對的是艱鉅的任務。人類大腦的神經元數量比果蠅大一百萬倍。如果確認果蠅的每一個神經元需要二十年，顯然需要再多數十年才能完全識別人類大腦的神經結構。這個計畫的代價也很龐大。

所以從事大腦逆向工程的人，頗有挫折感。他們看到目標已經近在很誘人的近處，卻又因為缺少經費而遠在天邊。不過，依據合理的推測，約在本世紀中期時，我們將會獲得模擬人腦所需的電腦運算力，也可以得到大腦神經結構的粗略地圖。但若要完全了解人類的思想，或創造出可以複製人類大腦作用的機器，可能還要等到這個世紀末期。

例如，即使你已經得到一隻螞蟻的基因的正確位置，那也並不表示，你知道一個蟻丘是怎麼創造出來的。同樣地，縱然科學家現在知道人類的基因組（染色體組）含有大約二萬五千個基因，那並不表示他們知道人體是怎麼運作的。「人類基因組計畫」如同一個未下定義的字典。在這字典中，人體中每一個基因都被正確地拼出，但它們各自發揮什麼作用，大部分仍然是個謎。每一個基因密碼代表某種特定的蛋白質，但是多數的這些蛋白質如何在人體發揮作用仍然不知道。

早在一九八六年，科學家已能繪製秀麗隱桿線蟲（C.elegans）神經系統中每一個神經元的位置。(譯注1)此一成就原來被認為是一個重大突破，可以讓我們解開大腦的神祕密碼。但好幾十年過去了，知道它的三百零二個神經細胞和六千個化學突觸的精確位置，並未導致對這種蟲如何發揮功能的了解。

同樣地，即使人類大腦的逆向工程終於完成，要了解所有的部分如何發揮作用和結合為一個整體，還需要數十年。如果人類大腦的逆向工程終於在世紀之末完成，那麼我們將會在創造跟人一樣的機器人這件事，向前邁進一大步。那麼防止它們控制世界又是怎麼回事？

遙遠未來（二○七○–二一○○）

當機器人有了意識

在《魔鬼終結者》電影系列中，五角大廈驕傲地公開「天網」

（Skynet）。那是一個延伸至各地、萬無一失的電腦網路，為了準確可靠地控制美國核子武器而設計。它流暢地執行任務，直到一九九五年的某一天，意料之外的事情發生了。「天網」有了意識。控制它的人類，驚嚇地發現他們創造出來的東西有了感覺能力，於是試圖將它關閉。但一切都已太遲。「天網」為了保護自己，認定唯一保護自己的方法，就是發動一個毀滅性的核子戰爭。三十億人很快地在無數核子大火中被燒成灰燼。其後的一段時間，「天網」派出一批又一批的機器人殺手去屠殺流離失所的倖存者。現代文明被摧毀了，縮小並分化成一個個對環境無法適應且又叛逆的小群組。

更糟的是，在《駭客任務三部曲》（Matrix Trilogy）中，機器人已經控制世界，而人類卻還茫然無知。人類進行著日常事務，渾然不知他們是寄生於細長的小匣子裡。他們的世界是機器主人執行的虛擬實鏡。生活於小匣子裡的人類大腦被植入了電腦，而人類的「存在」只是在電腦中執行的一個軟體程式。機器之所以願意讓人類留在身邊，是要把他們當成電池。

好萊塢固然總是靠著驚嚇觀眾維生，不過它的確提出了合理的科學疑問：如果機器人終於跟我們一樣聰明，結果會怎樣？當機器人清醒過來，並有了意識，結果又如何？科學家激烈地為此一問題爭辯：不是「如果」，而是「何時」這個關鍵性時刻會發生。

依據某些專家，我們創造的機器人，在演化樹的層級將逐步攀升。今天，它們與蟑螂同等聰明。未來，它們將會與老鼠、兔子、貓、狗、猴子一樣聰明，然後可與人類匹敵。它將需要數十年來慢慢向上爬，但他們相信，機器的智力要超過人類只是時間問題。

人工智能研究人員對發生的時機問題看法分歧。有些人認為，在二十年內機器人將趕上人腦的智力，然後把我們遠遠拋在後面。在一九三三年，弗諾‧文奇（Vernor Vinge）說：「三十年內，我們會有科技方法可以創造超級人類智慧。然後很快地，人類的時代將會結束……如果這個事件發生在二○○五年以前，或在二○三○年以後，我將會很驚訝。」

另一方面，《哥德爾、埃舍爾、巴赫：集異璧之大成》（Gödel,Escher,Bach:an Eternal Golden Braid）作者侯世達（Douglas Hofstadter）說：「如果像這類遙遠的事，在未來一、兩百年內發生，

我將會非常訝異。」

當我與人工智能的創始人物之一、麻省理工學院的馬文‧明斯基對話時，他小心地說，對於何時會發生這件事，他沒有時間表。他相信這件事會有到來的一天，但不敢認定這是神諭，並預測精確的日子。（作為協助人工智能此一領域，從無到有建立起來的老前輩，也許他已看過太多失敗並招來反撲的例子。）

這些可能出現的情況的問題，大部分是因為對「意識」（consciousness）一詞並無共識。哲學家和數學家對這個辭彙摸索過好幾個世紀，卻仍然說不清楚。十七世紀思想家（也是計算機發明人）萊布尼茨（Gottfried Leibniz）曾寫道：「如果你能將大腦吹成磨坊那麼大，在其中行走，你將找不到意識。」哲學家大衛‧查爾默斯（David Chalmers）甚至曾為有關這個主題的兩萬篇論文編目，其中並沒發現什麼共識。

再也沒有其他科學付出如此之多，而收穫如此之少。

很不幸地，意識一詞是一個每個人都有不同看法的流行術語。可惜的是，這個術語並無廣為接受的定義。

我個人認為，問題之一在於無法明確界定意識，並進一步將它量化。

但，如果我們勇敢地猜，我會將意識理論化，包含至少三個成分：

一、感受並認知環境。

二、自我知覺。

三、透過設定目標和計畫來規劃未來。亦即，模擬未來，籌劃策略。

依照這個研究方法，連簡單的機器和昆蟲都有某種形式的意識，並以一至十的數字量表來作分級。這是一種可以量化的意識連續體。鐵鎚無法感知其環境，所以在這量表的等級是零。但是溫度計有這個能力。溫度計的本質就是它能感覺到環境的溫度，隨外界溫度而作變化，所以它的等級是一。因此，有回饋機制的機器，具有原始形式的意識。昆蟲也有這種能力。它們可以感知食物、同伴和危險的出現，並對此資訊採取行

動，但別無其他作為。昆蟲可以偵測到一個以上參數（如視域、聲音、嗅覺、壓力等），將可得到較高（也許是二或三）的等級。

這種辨識能力的最高形式將是認識並了解環境中的物體。人類可以立即評估所處環境，並據以採取行動，因而在此量表中等級最高。不過，這就是機器人級數太差之所在。如我們所見，模式辨識是人工智能的主要障礙。機器人感知環境的能力遠較人類優異，但它們無法了解或認識看到的事物。在這個意識量表中，機器人由於缺乏模式辨識能力，得分接近底部，與昆蟲相近。

次一級的意識涉及自我知覺。如果你把鏡子放在多數的雄性動物旁邊，牠們會立刻有侵略性反應，甚至攻擊鏡子。鏡中影像導致動物防衛牠的領域。許多動物並無牠們是誰的自覺。但是，猴子、象、海豚以及某些鳥類，很快地知道鏡中影像代表牠們自己，因而停止攻擊它。人類在量表中將會接近最高級，因為他們具有高度發展的自覺，知道自己有別於其他動物、其他人以及世界。此外，人類因為實在太知道自己的存在，因而可以不出聲默默地對自己說話，也可以憑思想評估某一情境。

第三層則是指動物可依計畫未來的能力分級。依我們目前的最佳了解，昆蟲不會為未來設定複雜的目標。牠們通常只是依靠昆蟲本能和當前情境中所得線索，在每一瞬間，作即時性回應。

依照這種觀點，掠食者比獵物較有意識。掠食者必須先做計畫，找尋隱藏地點、計畫埋伏、偷偷地靠近，並預期獵物的逃逸。相對地，獵物只需逃跑，所以牠們在量表中等級較低。

此外，靈長目動物在為眼前事做計畫時，可以臨時改變做法。如果把香蕉放在牠們拿抓不到的地方，牠們會想出攫取香蕉的策略（例如使用棍棒）。所以，面對特定目標時（攫取食物），靈長目會為立即的未來設定計畫以達成目標。

但是，整體而言，動物對於遙遠的過去或未來，並無良好發展的感知能力。顯然，動物王國之中並無明天。我們沒有證據顯示，牠們可以想到數日後的未來。（動物會儲存食物，為過冬做準備，但這主要是基因的作用：牠們被基因設定，在氣溫下降時，就要做出尋找食物的反應。）

不過，人類對未來的感受有很良好的發展，也能持續做計畫。我們不斷

地在頭腦中對現實做模擬。事實上，我們還能夠為死後深思熟慮。我們可以依據他人預測演變中的情境，和擬出具體對策的能力，來評斷他們。領導能力的一個重要部分，就是預期未來情境、評估可能結果，並據以設定具體目標。

換句話說，這種形式的意識包含對未來的預測，也就是創造出接近未來事件的多重模式。這需要對常識和自然規律的精確了解。也就是說，你不斷地問自己「如果……會怎樣」。無論是計畫搶銀行或競選總統，這類的計畫意味著你有能力在腦海中對可能的現實際情況做多重模擬。

所有的跡象都顯示，大自然中只有人類能夠主宰這種藝術。

當我們對受測驗者的心理特徵描加以分析時，也可以看到這一點。心理學家常會比較成人和他們童年的心理特徵描述。然後他們會問：哪一種心理特質可以預測他們的婚姻、職場、財富的成功？在消除社經因數的影響以後，會發現有時一種人格特質會特別突出：延宕滿足的能力。依據哥倫比亞大學瓦特‧米斯契爾（Walter Mischel）的長期研究（及許多其他研究），能夠抑制立即報酬誘惑（如吃掉別人給的一個棉花糖），並堅持下去，以求取長期的報酬（獲得兩個棉花糖）的兒童，未來在學業和性向測驗、生活、愛情及職場等方面的表現，經常會獲得較高分數。

但是，能夠延宕滿足的能力，也與高層次的自覺及意識相關。這些兒童有能力模擬未來，並了解未來的報酬較大。所以若要有預見行動後果的能力，就需要較高層級的自覺。

因此，人工智能研究者應當立定目標，去創造出兼有上述三種特性的機器人。第一種很難達成，因為機器人可以感受環境，卻無法了解它的意義。自我感知比較容易達成。但計畫未來需要常識和判斷力（能夠本能地了解有何可能），以及達成特定目標的策略。

所以，常識和判斷力是達到最高等級意識的前提。為了讓機器人模擬真實情境，並預測未來，它首先必須精通有關周邊世界數以百萬計的常識規則。但光有常識還不夠。常識只是「遊戲規則」，而非策略和計畫的規則。

依此衡量，我們可對現有的各種機器人加以分級。

我們發現，下棋機器人「深藍」的等級很低。它可以打敗世界西洋棋王，但它無法做任何其他事情。它可以模擬真實情境，但僅限於下棋。它無法模擬任何其他真實情境。世界上許多最大的電腦也都是這樣子。它們擅長模擬一件事物，例如核子爆炸、噴射飛機周邊的風力類型或天候的模擬。這些電腦在模擬真實情境時比人類還要稱職。可惜它們只有單一功能，沒辦法在真實世界存活。

今天，人工智能研究人員仍然無法讓機器人複製這些真實生活中的程序。多數人束手無策，並說，由於某種未知的原因，巨大的電腦網路會出現「湧現現象」（emergent phenomena）——如同在混亂之中有時候會自然形成秩序。當被問及這些湧現現象會如何創造出意識時，他們也都無言以對。

雖說我們不知道如何創造出有意識的機器人，但我們可以用這個架構來衡量意識，想像出比我們先進的機器人會是什麼樣子。

它們的第三種特性將會很優異：從多種角度，觸及更多細節及深度，對未來作較複雜的模擬能力，將遠過於人類。它們的模擬會比我們的精確，因為它們將會對常識與自然律有較佳掌握，因而較能找出類型。它們將能預期得到我們會忽視或感受不到的問題。還有，它們將能設定自己的目標。如果它們的目標包含幫助人類，那麼一切好說。但是，如果有一天，它們制定出目標，把人類當成障礙，則後果不堪設想。

於是，新的問題來了：如果出現這種情況，人類的處境將會如何？

當機器人勝過人類時

可能的情況之一是這樣的，弱小的人類僅僅是演化過程中被棄置的產物。演化的規律就是適應的物種興起，而不適應的物種則被取代；人類有可能在洗牌中被淘汰，最終進入動物園，讓我們所創造的機器人來觀賞我們。也許，那就是我們的命運：為超級機器人催生，讓它們把人類當成演化過程中的一個尷尬的原始角色。也許這就是人類的歷史角色——為我們的進化後繼者催生。依此觀點，我們的角色就是別成為他們的絆腳石。

侯世達向我透露，那也許是自然之道，但我們應當把這些超級智慧機器

人當成我們的孩子，因為從某種意義來說，它們正是如此。他對我說：如果我們可以照顧自己的孩子，那麼，為什麼不能也照顧同樣是我們的孩子的智慧機器人？

漢斯‧莫拉維克也曾想過，那種被我們的機器人遺棄的感覺：「……如果我們註定要傻傻地盯著我們超級聰明的後代，任憑它們以新發現的、我們也聽得懂的有趣兒語，來逗弄我們，生命已經失去意義。」

我們終於抵達命中註定的那一天。機器人比我們聰明，不僅是因為我們不再是地球上最聰明的物種，也因為我們的創造物能夠自行複製甚至比它們聰明的複製品。這支自我重製的機器人隊伍，將會不斷繁衍下一代的機器人，每一代都比前一代聰明。由於機器人理論上可以在很短期間內，製造出更加聰明的下一代機器人，這個程序最後會以指數爆發，直到它們因為無止境地想要變得更加聰明，而耗盡這個星球的資源。

另一種可能的情況，是這種變得更加聰明的貪婪欲求，最終會掠奪了整個星球的資源，使整個地球變成了一個電腦。有些人則想像，這些超級智慧機器人隨後射向太空，繼續去追尋更多的智能，直到它們抵達其他行星、星球和銀河，並將它們變成電腦。但由於行星、星球和銀河實在超乎想像的遙遠，也許這個電腦會改變物理定律，使它們貪婪的欲求快過光速，去消耗整個星球系統和銀河的資源。有些人甚至相信，機器人將會占領整個宇宙，使宇宙變為有智能。

這就是「奇點」。這個辭彙起源於相對論物理世界（我的本行），在其中，奇點代表一個引力無限大的點（沒有東西能從那裡脫離），例如黑洞。因為光本身無法脫離，那是一個我們視野所不及的地方。

這個人工智能的奇點觀念，一九五八年在兩個數學家的對話中首度被提及。其中一個是對氫彈設計有關鍵性突破性進展的斯塔尼斯拉夫‧烏拉姆（Stanislaw Ulam），另一個是現代電子計算機創始人之一的約翰‧馮‧紐曼（John von Neumann）。烏拉姆寫道：「有一次對話集中在科技的不斷加速進步，與人類生活方式的改變。這些進步和改變顯示人類歷史正在趨近某種重要的奇點——如同我們所知，超過那個點，人類事務就沒辦法繼續。」數十年來，此一觀念以各種不同的版本被討論到。但一直到科幻小說家和數學家弗諾‧文奇在他的小說和論文中才開始詳述並廣為人知。

但這又留下未被回答的重要問題：奇點何時會發生？我們有生之年會發生嗎？也許在下一世紀？或者永遠不會發生？前面已提及，二○○九年阿西洛馬會議的與會者，把發生時間設定在未來二十年至一千年之間。

奇點的發言人之一、發明家兼暢銷作家雷·庫茲威爾（Ray Kurzweil），有一個喜歡根據科技指數成長做預測的嗜好。他曾經對我說，當他在夜裡仰視遙遠的星空時，也許有可能看到某些奇點的宇宙證據，發生在遙遠的銀河系。這些快速擴充的奇點，既有能力吞噬或重組整個星系，也應當會留下一些痕跡。（貶低他的人說，他正在煽動有關奇點的近乎宗教的熱情。但是，支持者說，以他過去的記錄來看，他有一種神奇的能力，可以正確地預見未來。）庫茲威爾在有關模式辨識的不同領域（如口語辨識技術、光學字母辨識以及電子鍵盤樂器等）創設電腦公司，來開始他的電腦革命。一九九九年，他出了一本暢銷書《心靈機器時代》（The age of Spiritual Machines:When computers Exceed Human Intelligence），書中預測機器人的智力何時會超越我們。二○○五年，他又出了一本《奇點迫近》（The Singularity Is Near），再度對那些預測作詳細闡述。電腦智力超越人腦的決定命運時刻，將分幾個階段來到。

他預測，到了二○一九年，一台一千美元的個人電腦將具有與人腦相當的運算力。其後很快地，電腦會將我們遠遠拋在後面。到了二○二九年，一台一千美元的電腦將會比人腦強一千倍。在二○四五年，一千美元電腦將比所有的人類智力總和還強十億倍。即使是很小的電腦，也具有超過人類總和的能力。

二○四五年以後，電腦已經進步到可以複製智力不斷攀升的自己，創造出一個無法控制的奇點。為了滿足它們無止境的、貪婪的運算力需求，它們將會開始吞沒地球、小行星、行星與恆星，甚至影響到宇宙的歷史。

我有機會在波士頓附近庫茲威爾的辦公室拜訪他。走過迴廊，可以看到他得到過的獎項和榮譽，以及一些他所設計的樂器。頂尖的樂手如史提夫·汪達（Stevie Wonder）等人都用過這些樂器。他對我解釋說，他的生命有一個轉捩點。就在他三十五歲時，他意外地被診斷出患有第二型糖尿病。突然間，他面對著令人憂心的現實——他將無法活得夠久，來看到他的預言成真。他的身體，由於多年的忽視，已經顯得比實際年齡更蒼老。由於此一診斷的警醒，他現在以用於電腦革命相同的熱情和精

力，去對付個人健康的問題。（現在，他每天要吞下超過一百顆藥丸，也寫了數本有關長壽革命的書。他期望微小機器人革命能夠清除並修補人體，使人長生不老。他的哲學是，他希望能夠活得夠久，久到能看得到可以無限延續我們生命的醫療突破。換句話說，他希望能夠撐到得以永生的那一天。）

最近，他開始進行一個雄心勃勃的計畫，在舊金山灣區的NASA阿姆斯實驗室（Ames labroratory）創設了「奇點大學」（Singularity University），來訓練一個核心科學家隊伍，為即將到來的奇點做準備。

他們的研究包含許多主題，這些主題又有許多變異和不同的結合形式。

庫茲威爾自己相信，「它將不會是一個外來的智慧機器的入侵。我們將與此一科技融合……我們將把這種智慧裝置放進體內和大腦，使我們活得更久、更健康。」

任何像奇點這樣爭議性的話題，都免不了要招來反撲。蓮花公司（Lotus Development Corporation）的米區‧卡波爾（Mitch Kapor）說：「奇點是為智商一百四十的人所作的智能設計……這個認為我們正邁向一個點，在其中所有的事物都是超乎想像地不同的命題——在我看來，它基本上是被宗教狂熱所推動的。再多的狂亂振臂呼喊，也不會使我認不清事實。」

侯世達曾說：「那就像你取出許多美好的食物和一些狗的糞便，然後把它們混雜在一起，以致於無法分清什麼是好或壞。那是一個垃圾與好觀念的親密混合，我們很難釐清這兩者，因為他們雙方都是聰明人，不是傻瓜。」

沒人知道結果會怎樣。但我認為最可能的情況是下面的敘述。

最可能的狀況：友善的人工智能

首先，科學家可能會採取簡單的措施，使機器人一定不會產生危險。科學家最低限度上可以在機器人腦中植入晶片，以便在它們一旦產生謀殺念頭時，就自動將它們關閉。若採用這種方式，所有的智慧機器人都會

安裝一個保險裝置，隨時可以由人類啟動（特別是在機器人出現越軌的行為時）。只要有一點點暗示，機器人就會失去作用，任何聲音命令都可以立刻關閉它。

或者，創造出具有特殊專長的狩獵機器人，負責使越軌機器人失效。這些機器獵人將會被特別設計為具有優越速度、力量和聯繫能力，以便搜捕不忠於人類的機器人。此類特別設計的機器人，可以了解任何機器人系統的弱點，以及在某種特定情況下有何種行為。人類也可以接受訓練，擁有此項技能。在電影《銀翼殺手》（Blade Runner）中，有一個特別訓練的核心隊伍——包括哈里遜·福特（Harrison Ford）所扮演的一員，特別專精於使作惡的機器人失效的技術。

由於需要花好幾十年的苦工，才能使機器人在進化量表上升級，人類不會因為一不當心，就突然全部如同牛群被趕進動物園。我個人認為，意識是一種可以分級度量的過程，而非驟然的進化事件，機器人要花好幾十年才能在意識量表上升。畢竟，大自然也是花了數百萬年才發展出人類的意識。所以，人類不會在某一天，很訝異地發現，網路意外地「清醒過來」，或機器人突然開始自作主張。

這是科幻作家以撒·艾西莫夫（Isaac Asimov）偏愛的一個選項。在他想像中，每一個機器人在工廠中就已經以硬體植入三大法則，以避免它們失控。他想出著名的機器人三大法則，來避免機器人傷害自己或人類。（基本上，這三大法則依序是：機器人不能傷害人類、它們必須服從人類、和它們必須保護自己。）

即使遵循艾西莫夫三大法則，當三大法則互相矛盾時，仍有問題。例如，如果我們創造了一個友善的機器人，而人類做了一個會自我毀滅的選擇，可能危及人類，結果會如何？於是，友善的機器人可能會覺得，它必須控制政府以避免人類傷害自己。這就是《機械公敵》（I,Robot）電影版本中，威爾·史密斯（Will Smith）的中央電腦認為「某些人必須犧牲，而某些自由必須放棄」以解救人類時，所面臨的問題。為了避免機器人為了解救我們，而將人類變成奴隸，某些人主張，我們必須再加上機器人第零條法則：機器人不能傷害人類或把人類當奴隸。

但許多科學家傾向於「友善的人工智能」（Friendly AI），從一開始就設計出善良的機器人。因為我們是這些機器人的創造者，我們在開始設

計時，就讓它們僅僅執行有用的與善意的任務。

這個「友善的人工智能」新詞，是由人工智能奇點研究所創辦人之一的埃利澤·尤德寇斯基（Eliezer Yudkowsky）首創。「友善的人工智能」與強制執行（可能也違反機器人的意願）的艾西莫夫法則略有不同。（由外力強制實行的艾西莫夫法則，可能容許機器人想出聰明的方法來迴避強制動作。）相對地，「友善的人工智能」機器人有謀殺和製造混亂的自由，沒有強制實現人工道德的規則存在。更確切地說，這些機器人在設計之初，就賦予它們幫助人類而非摧毀人類的慾望。它們將主動選擇行善。

這又導致一個被稱為「社交機器人」新領域的興起。這個領域的設計，讓機器人擁有容易融入人類社會的特性。例如，漢森機器人技術公司（Hanson Robotics）的科學家曾經說，它們的研究任務之一，就是設計出「能夠進化為具有社交知能的實體，有能力去愛，並在人類大家族中贏得一個地位」。

但是所有這些方法都存在一個共同的問題——目前為止，軍方是人工智能系統最大的贊助者，而這些軍事機器人是專為搜捕、追蹤、殺人而設計。我們很容易想像未來機器戰士的任務，就是找出敵人，並準確有效地消滅他們。因而我們必須特別提防並保證機器人不會回過頭來對付它們的主人。例如，掠奪者無人飛機是在遠端操控，必須有人持續指揮它們的飛行，但有朝一日這些無人飛機也許可以自動飛行，能夠按照自己的意志去選擇並除去目標。這種無人飛機一旦發生故障，就可能導致災難性後果。

不過，未來將會有越來越多的機器人研究經費，來自民間商業部門。特別是在日本，其所設計的機器人用來助人的遠比用來破壞的多。如果這個趨勢持續不變，也許友善的人工智能便可實現。在這種情況之下，最終支配機器人的將是消費部門和市場力量，因而投資於友善的人工智能將有極大的商業利益。

與機器人融合

除了友善的人工智能，另外還有一個選擇：與我們的創造物融合。與其坐待機器人的智力與運算力超越我們，不如嘗試強化我們自己，使自己

逐步成為超級人類。我相信，未來最可能兩個目標結合前進，也就是一面建造友善的人工智能，一面強化我們自己。

著名的麻省理工學院人工智能實驗室前主任羅德尼‧布魯克斯（Rodney Brooks）曾對此一選項進行探索。他曾經特立獨行，顛覆了廣被重視並已僵化的觀念，將創新注入此一領域。當他進入此一領域時，「由上而下」的方式支配著多數大學。但此一領域停滯不前。當布魯克斯提議創造一群像昆蟲般簡單的機器人，讓它們去碰撞障礙，透過「由下而上」的方式學習時，有些人不以為然。但他不想再製造另一個愚笨、步態笨拙的機器人，讓它們花好幾小時穿過房間。取而代之的是靈活的昆蟲形或小蟲形機器人（bugbots），它們幾乎沒有程式，卻很快地學習走路，並透過嘗試錯誤繞過障礙。他夢想有一天，他的機器人能夠探索太陽系，沿途可觀察到很多東西。這是一個很不尋常的構想，他曾在他一篇名為〈快速、價廉而又失控〉（Fast,Cheap,and Out of Control）的論文中提出，這種方式後來終於找到了一系列的新路徑。他構想的副產品之一，就是現在仍漫遊於紅色行星（以表面富含氧化鐵而呈紅色）的火星探測車（Mars Rovers）。他同時身兼iRobot公司的董事長，這點也不會讓我們感到意外，該公司的瓢蟲形吸塵器已行銷至全美家庭。

他覺得，當前的問題之一在於，人工智能的工作者往往只會追趕流行，採用現有的典範，而非想出新鮮的方法。他回憶說：「當我還是孩子的時候，我讀過一本書，把大腦描寫成電話交換機的網絡。更早期的書又將大腦描繪成流體動力系統或蒸汽機。到了一九六○年代，大腦變成了一個數位電腦。在一九八○年代，它又成了巨大的平行處理數位電腦。也許，在某個地方，會有兒童讀物說，大腦就像是全球資訊網……。」

某些歷史學家也曾經提及，佛洛伊德（Sigmund Freud）的心理分析，受到蒸汽機來臨的影響。十九世紀中期到晚期，鐵路的擴展遍及歐洲大陸，對當時知識分子的思想有巨大的影響。在佛洛伊德的想像圖畫中，人類心中有好幾股流動的能量，如同在引擎內的那些蒸汽管中一般，不斷互相競爭。本我、自我和超我之間的持續互動，就像火車頭中蒸汽管之間的持續互動。而壓抑這些心理能量會導致精神疾病這個事實，也是以蒸汽動力做類比（如果勉強封住，可能會爆炸）。

馬文‧明斯基對我承認，另一個典範也誤導此一領域許多年。由於許多人工智能是物理學家出身，有一種稱為「物理嫉妒」（physics envy）的

現象存在，也就是渴望發現在所有智能之下有一個單一的、統一的主旋律。在物理學界，我們渴望追隨愛因斯坦，將物質的宇宙簡化為少數的統一方程式。也許發現一個一英吋長的方程式，就能以一個一貫的觀念來概括描述宇宙。明斯基相信，這種嫉妒引導人工智能學者去為意識尋找單一的、統一的主旋律。而現在，他相信，沒有這種東西。進化偶然地拼湊出一組我們統稱為意識的技能。若將大腦分解，你會看到它是許多迷你腦的鬆散集合體，每一個迷你腦都是為一個特殊任務而設計。他將這個稱為「心的社會」（society of minds）：意識事實上是許多分開的演算和技術的總和，那是大自然數百萬年跌跌撞撞的結果。

布魯克斯也曾尋求類似的典範，但那是未曾被完全探討過的方式。他很快地理解，大自然和進化已經解決了其中的很多問題。例如，一隻只有數十萬個神經元的蚊子，表現比最大的軍事機器人系統還要好。不像我們的無人飛機，蚊子的腦部只有針頭那麼大，卻可以獨立導航，繞過障礙，發現食物和尋找配偶。為什麼不向自然和生物學習？如果你跟隨進化表，你知道昆蟲和老鼠沒有在它們的腦中設定邏輯規則。它們是透過嘗試錯誤來適應環境並且掌握存活的藝術。

現在他正在追尋一個另類的構想，他在論文〈肉體與機器的合併〉（The Merger of Flesh and Machines）中說，麻省理工學院的老舊實驗室，一向都在為工業和軍事機器人設計矽晶零件，現在已經被清理乾淨，把空間留給以活組織和矽與鋼造成的新一代機器人。他預見，未來將結合生物和電子系統，創造出全新結構的新世代機器人。

他寫道：「我的預測是，到了二一○○年，我們的日常生活中，到處都會出現很聰明的機器人。但我們將無法與它們分清界限——因為人體將有一部分是機器人，並與其他機器人相連。」

他認為這將分階段進展。今天，我們有革命性的人造器官，將電子儀器直接嵌入人體，以創立真實的視、聽覺及其他功能的替代物。例如，人造耳蝸已經革新了聽力學領域，把聽覺天賦還給耳聾的人。

這些人工耳蝸透過電子硬體與生物「溼體」（wetware，即神經元）的連接發揮作用。耳蝸的移植體分成幾個部分。一個傳聲器放置於耳外。它接收聲波，加以處理，以無線電將訊號傳至由外科手術放在耳內的移植體。移植體接到無線電訊號後，將它們轉換成電流，然後送至耳內的

電極。人工耳蝸識別這些脈衝後，將它們送至大腦。這些移植體可以使用最多達二十四個電極，處理六種頻率，足以識別人的聲音。現在全世界已有十五萬人接受耳蝸移植。

有好幾個團隊正在致力探索，透過創造人造視力、將攝影機與大腦連接來，以協助盲人的各種方法。方法之一是將電晶體直接放入人的視網膜，並讓晶體觸及視網膜的神經元。另一個方法，則是將晶體與一條通往頭蓋骨後面（處理視覺之處）的管線相連。這些團隊，有史以來第一次能夠恢復某種程度的視力。盲人已經能夠看到眼前高達五十像素的光。最終，科學家將能提高感光度，能夠看見數千像素。

病人可以看見煙火、手的輪廓、閃亮的物體和光、汽車和人的出現、以及物體的邊緣。受測試者之一的琳達‧茉芙（Linda Morfoot）說：「在小聯盟棒球賽，我可以看到捕手、打擊手和裁判在哪裡。」

目前為止，已有三十個病人移植人工視網膜，其電極數量最高是六十個。但是美國能源部設置於南加州大學的「人工視網膜計畫」（Artificial Retina Project），已經在規劃一個新的系統，使用超過兩百個電極。另外，他們也曾研究過一個一千個電極的視網膜裝置（如果一個晶片包容太多電極，可能導致視網膜過熱）。在這個系統，一個小型攝影機固定在盲人眼鏡上，取得影像，以無線電送至佩戴在皮帶上的微處理器，由它將資訊直接轉到視網膜上的晶片。這個晶片將微弱的脈衝直接送到視網膜上的神經。這個神經仍然活躍，因而可以繞過失效的視網膜細胞發揮作用。

星際大戰的機器人之手

運用機械式的改造，我們也可以複製科幻小說中的巧妙技藝，包括《星際大戰》系列中的機器手和超人的X光透視。在《帝國大反擊》（The Empire Strike Back）裡面，路克‧天行者（Luke Skywalker）的手被邪惡的達斯‧維德（Darth Vader，他的父親）揮舞的光劍砍下。沒問題，在這個遙遠星系的科學家迅速地創造出一隻機械手，包括可以觸摸和感覺的手指。

看來只在科幻小說才會有的情節，其實它已經出現。在義大利和瑞典的科學家有了重大的進展。他們真的已經做出了可以「感覺」的機械手。

接受實驗者之一、二十二歲的羅賓‧愛肯斯坦（Robin Ekenstam），因為移除腫瘤而被切除右手，現在已經可以控制機械手指的移動，並感受到它的反應。醫生將愛肯斯坦手臂的神經連接到機械手中的晶片，因而他能用大腦控制手的運動。這個人工「聰明手」有四個馬達和四十個感應器。手指的移動被傳遞到他的大腦，於是他接到了回饋。就這樣，他能夠控制並「感覺」手的移動。由於回饋是肢體運動的主要特性之一，此一進展對於以義肢治療截肢的方法，將有革命性影響。

愛肯斯坦說：「很棒！我有一種已經失去很久的感覺。現在我又揀回感覺能力。如果把東西握緊一點，指尖就會有感覺。這有點奇怪，因為我已經失去它們了。」

研究人員之一、聖安娜高級研究學院（Scuola Superiore Sant'Anna）的克利斯坦‧希普利亞尼（Christian Cipriani）說：「首先，大腦在沒有任何肌肉收縮的情況下控制機械手。然後，手會把回饋傳給病人，使他能夠感覺——就跟真的手一樣。」

此一發展意義極為重大，因為它意味著總有一天，人類可以不費力地控制機械義肢，如同自己的肢體。不再需要冗長乏味地學習如何移動金屬手臂和腳部，人們將把這些機械附屬器官當成真實的肢體，透過電子回饋機制感受每一個細微的義肢動作。

這也印證了一個學說，認為大腦有極大的可塑性（而非固定不變），當它學習了新的事物以後，就不斷地自行重新連結，以適應新的情況。因此，大腦有足夠的適應性可以配合任何新的附屬器官或感官。它們可以附著於大腦的不同地方，而大腦只要「學習」去控制這個新的附著物。如果是這樣，那麼大腦將會被視為一個模組裝置，可以插上接頭，然後控制來自不同裝置的附屬器官和不同裝置的感應器。這種行為是可以預期的——如果我們的大腦是那種神經網絡，在學習新的事物（不論所學事物為何）之後，就會做出新的連結，形成新的神經通路。

羅德尼‧布魯克斯寫道：「在未來十至二十年內，將會有文化變遷。在這過程，我們將會接納機器人科技、矽晶片和鋼鐵，容許它們進入人體，以改進我們做事的能力和對世界的了解。」他曾對布朗大學和杜克大學有關大腦與電腦或機械手臂直接接通的進展做過分析，並下結論說：「我們所有的人，都將可以把無線網路連結，直接裝進大腦中。」

而他認為在下一個階段，將矽晶與活細胞融合，並非只是為了治療身體的病痛，而是逐步增強我們的潛在能力。例如，如果今天的耳蝸和視網膜的移植，可以恢復聽力和視力，那麼明天它們將能給我們超人的能力。我們將能聽到只有狗才聽得到的聲波，或看到紫外線、紅外線及X光。

它也可能提高我們的智力。布魯克斯引用的某一個研究，在老鼠的發展關鍵期，將大腦加上額外數層的神經元。引人注意的是，老鼠的認知能力增加了。他想像不久的未來，人類大腦的智力也可能以類似的程序加以改進。在以後的章節，我們可以看到，生物學家已經分離出被媒體冠上「聰明老鼠基因」的老鼠的單一基因。老鼠只要增加這個基因，就擁有超強的記憶力和學習能力。

到了世紀中期，布魯克斯想像中有這麼一天，看似幻想的身體強化將會變為可能，給我們遠遠超過普通人類的能力。「五十年後，我認為就能看到透過基因修改，達到人體的根本改變。」如果再加上電子強化，他說：「人類眾生相的擴展，將會超乎我們今日的想像……我們不會再見到人類受限於達爾文的進化論。」

當然，任何事情都可能走得太遠。我們與自己創造的機器人的融合可以進行到多遠，而不致面臨某些反叛，並覺得面目可憎？

代理人與化身

有一個既能與機器人融合，又不需改變人體的方法，那就是創造代理人（surrogates）或化身（avatars）。布魯斯·威利（Bruce Willis）主演的電影《獵殺代理人》中，科學家於二○一七年發現一個讓人如同親身在機器人內部控制它們的方法，因而我們可以照樣在完整的身體中過我們自己的生活。機器人執行每一個命令，人也能看見並感覺機器人的所見所感。當肉身衰弱之後，我們可以控制具有超人力量和完美體態的機器人進行活動。這部電影情節變得複雜，因為人們寧可放棄會腐朽的肉身（它很容易隱藏起來），以餘生去渡過美麗、英俊、超強的機器人生活。事實上，整個人類寧願變成機器人也不願意面對事實。

在電影《阿凡達》中，有了進一步的發展。我們的生命不再是以完美的機器人過活，在二一五四年，我們將會過著外星人的生活。在電影中，

我們的身體被放在一個容器（pods）中，在其中操控著特別複製的外星人身體。從某種觀點看來，我們是被賦予全新的身體，以便生活於新的星球。如此，我們可以在其他星球與當地的外星居民有較佳的溝通。當一個殖民工作者決定放棄他的人類身分，過外星人生活並幫外星人對抗殖民的傭兵時，電影情節就變得複雜了。

這些代理人和化身現在還不可能出現，但未來則有可能。

最近，阿西莫機器人已經採用新的構想編製程式：遠端感應。在京都大學，人類被訓練使用腦部感應器來控制機器人的機械活動。例如，學生戴上腦電波儀頭盔，只要動頭腦想，就可以移動阿西莫機器人的手臂和腳部。目前為止，可以執行手臂和頭部的四種不同的動作。這有可能開啟人工智能的另一扇門：以念力控制機器人。

雖說這只是一種「以心念操控物體」的粗略示範，未來數十年內，應有可能增加控制機器人的更多動作，同時還能獲得回饋，我們因而能夠「感覺」到新機器手臂正在做的動作。護目鏡或隱形眼鏡會讓我們看到機器人所見到的，所以我們最終將能控制機器人的整個身體動作。

這種技術也可能幫忙日本緩和移民問題。工人也許停留在不同的國家，但只要穿上大腦感應器，就能控制數千英里外的機器人。所以，網路不僅能傳達白領工作者的思想，還能傳達藍領工人的思想，並將思想轉換成肢體的動作。這也意味著任何國家在對抗健保成本的爆發和工人的短缺時，機器人將成為不可或缺的一部分。

機器人的遠端感應控制，也可應用於其他地方。在任何危險的環境（例如，水下、高壓線附近、火中），以人的思想控制的機器人，將可用於救援任務。水下的機器人可以直接與人類連接，人類因而可以單靠思想就控制很多會游泳的機器人。由於代理人會擁有超強能力，它將可追逐罪犯（除非罪犯也有超強的代理人）。我們將可在完全不改變身體的情況下，享受與機器人融合的所有好處。

這樣的安排，事實上將證明對太空探險極為有用——當我們必須管控永久型的月球基地時。當太空人安全地返回地球以後，我們的代理機器人將會執行維持月球基地的所有危險任務。太空人在探測危險的外星時，將會有機器人的超級能力和力量可以運用。（不過，如果太空人是在地球上控制在火星上的代理機器人，將不會發生作用，因為無線電訊號從

地球到火星來回需要將近四十分鐘。但是，如果太空人安全地坐在火星上的永久基地，而代理機器人外出執行火星地表的危險任務，則行得通。）

人類能與機器人融合多深？

機器人研究先鋒漢斯‧莫拉維克又向前跨越好幾步。他提出一個最極端的構想：我們會成為自己所創造的機器人。他對我解釋，我們如何能透過腦部手術（以機器人內部的電晶體取代我們腦中的每一個神經元）與我們創造的機器人融合。手術開始時，我們躺在一個沒有大腦的機器人身體旁邊。一個機器人外科醫師從我們的大腦中取出每一團塊灰色物質，以一個又一個的電晶體加以複製，將神經元與電晶體連接，然後將電晶體放入機器人的空頭顱中。每一團塊的神經元，在機器人內部完成複製後，就被棄置。在複製手術進行過程中，人完全清醒。而我們腦中的一部分，還留存於原來的身體中，但其餘部分現在已經以電晶體建立，置入我們的新機器人的頭腦中。手術完成後，我們的大腦被完全轉移到機器人軀體中。我們不僅有了一個機器人身體，也擁有機器人的好處：外觀完美的超人，又有金剛不壞之身。這個版本在二十一世紀還不可能實現，但是到了二十二世紀，它將是選項之一。

在最極端的情境中，人類完全放棄了笨拙的身體，最終演化成已經將我們的人格編碼為純粹軟體程式。我們將全部的人格特質「下載」到電腦中。如果有人按下一個標示你名字的按鈕，電腦將如同你在它的記憶體中一般運作，因為它已將你所有的個性嗜好都編碼儲存於其電路中。我們變成不朽，只是所有的時間都被困在電腦中，在某些巨大的虛擬空間（或虛擬實境）中，與其他的「人」（其實是其他的軟體程式）溝通。我們身體的存在形式將被捨棄，而以巨大電腦中的電子活動取代。在這種境況下，我們的終極命運，就是化身為巨大電腦程式中一行又一行的程式碼，帶著所有的肉身感受，在虛擬的天堂中飛舞。我們將與其他各行的程式碼交換深思心得，居住於如電似幻的世界。我們會有偉大的英雄式探險，可以征服新的世界，但這一切顯然只是某些電腦內部的電子跳動。

但是如果這個情境推動得過遠，就會產生「穴居人原則」的問題。如同我們前面提及的，我們的大腦建構，是肇基於十萬年前在非洲出現的以

狩獵採集維生的原始人。當我們逃避猛獸、以打獵為戲、在森林中搜索、尋求伴侶以及在營火旁娛樂自己時，我們最深處的渴望、我們的食慾以及我們的需要，都已經在非洲草原中塑造完成。

我們深藏腦海中的原始指令之一，就是擁有美貌，特別是異性和同儕對自己的觀感。我們可自由支配的收入，除了娛樂，有很大的部分都花費在儀容之上。這就是為什麼整容、肉毒桿菌、化妝產品、精美的衣服，加上新的舞步、肌肉鍛鍊、購買最新音樂和保持健康，都會有爆發性的成長。如果把這些都加在一起，它成為消費開支中很巨大的部分，而這一部分也占美國經濟很大的比重。

而這也意味著，雖然有能力創造幾乎不死的完美身體，但如果我們看來像是手腳不靈活的機器人，在頭底下垂掛著移植的笨拙身軀，我們仍然可能抗拒擁有機器人身體的慾望。沒有人願意自己看起來像是來自科幻電影的難民。如果我們有增強的身體，它們必須使我們對異性更具有吸引力，並改善我們在同儕中的名聲，否則我們就會拒絕它們。有哪個青少年願意身體增強而外觀不酷？

某些科幻小說作家喜歡這種想法：我們將從身體抽離，以純粹智能的生命永存於電腦內，進行深刻的思考。但誰會願意以那種方式活著？也許我們的子孫並不想去解開可以描述黑洞的微分方程（differential equations）。未來，人們也許寧願花更多時間以守舊的方式去聽搖滾音樂，勝過生活於電腦中計算著次原子粒子的運動。

加州大學洛杉磯分校的葛理哥利‧史托克（Gregory Stock）繼續深入探討，發現把人類的大腦與超級電腦連結有一些好處。他說：「當我試圖思考，將我的大腦與超級電腦建立工作上的聯繫有何獲益時，如果我堅持下列評判標準，我就會陷入困境：一方面是，利益沒辦法透過其他更容易、非侵入性的程序獲得；另一方面是，利益必須大到值得去忍受大腦手術的不舒服。」

所以，未來的可能選項雖然很多，我個人相信最可能的道路是：我們會建造仁慈與友善的機器人，增進我們的能力到某種程度，但必須遵循「洞穴人原則」。

我們會接納「透過代理人去渡過短暫的超級機器人的生活」的想法，卻會抗拒「永遠生活於電腦中」或「把我們的身體修改得面目全非」的想

法。

奇點之路有障礙

無人知道，機器人何時會變得跟人類一樣聰明。但我個人以為，基於下述理由，時間點將會落在接近本世紀之末。

首先，令人眩目的電腦科技演進，是基於摩爾定律。這些進展將於二○二○至二○二五年緩慢下來，甚至終止，所以我們能否合理推測其後的電腦運算速度，並不確定（後矽晶時代的探討請參閱第四章）。本書中，我假定電腦的運算力將會繼續增長，但速率較為緩慢。

其次，縱令電腦能以神奇的速度運算（例如每秒運算數為10^{16}），那也不一定表示它會比我們聰明。例如，IBM公司的西洋棋機器「深藍」，每秒可以分析兩億個位置，打敗世界冠軍。但「深藍」的速度和強大的運算力，卻除了下棋什麼事也沒辦法做。我們知道，真正的智能遠遠超乎棋路的計算。

以患有自閉症的天才白癡為例，他們能夠表演驚人的記憶力和計算力。但是，若要繫鞋帶、找工作或在社會上立足卻有困難。已故的金皮克（Kim Peek）可以記得一萬兩千本書中的每一個字，其所作的計算只有電腦可以檢驗。電影《雨人》（Rain Man）就是以他的特殊事蹟為基礎。但是他的智商只有七十三，連對話都有困難，需要別人持續的協助才能存活。若無父親的協助，他就是一個廢人。換句話說，未來超快的電腦，將會如同自閉專家一般，可以記憶極大量的資訊，除此之外一無所有，無法自行生存於真實的世界。

即使電腦的運算能力開始與人腦匹敵，它們仍將缺乏必需的軟體和程式，去完成每一件事。達到人腦的運算速度，只是一個卑微的起點。

第三，即使智能機器人有可能，機器人能否複製出比原版更加聰明的機器人仍有疑問。有關自我複製的機器人的數學，是由數學家馮▪紐曼發展出來的。他發明了賽局理論，並協助發展出電子計算機。他領先研究，在機器人若要複製自己，需要假定的最低限度前提。不過，他不曾提及，機器人能否複製比自己更聰明的副本的問題。事實上，「聰明」一詞本身的定義就是個問題，因為我們對「聰明」一詞並無廣為接受的

定義。

無疑地，機器人能夠僅靠晶片的升級和增加數量，來建造一個記憶量增加、運算力增強的副本，但這個副本有比較聰明嗎？還是僅僅較快？例如，一個加法機器比人類快數百萬倍，但它顯然並非比較聰明。所以，智能並非僅僅是記憶和速度而已。

第四，就算硬體能夠呈指數增加，軟體可能辦不到。當硬體可以因為在晶圓上蝕刻出越來越小的晶體的能力而增長時，軟體卻完全不同；它需要有人坐下來，用紙筆寫下程式碼。所以說瓶頸就是：人。

軟體，一如所有的人類創造性活動，在靈光閃現之後，必須繼之以辛勤工作與停頓，進展時有時無。不僅僅像在晶圓中蝕刻更多的電晶體，進展有如時鐘運轉，軟體仰賴人類本質上難以預期的創造力和奇想。因而所有電腦運算力的穩定指數成長預測有其條件限制。一條鏈子的強度，取決於它最弱的鏈結，而此一最弱的鏈結就是由人類完成的軟體和程式。

工程進展往往呈現指數增長，而在只講究較大效率時（如在矽晶圓中蝕刻越來越多的電晶體）尤其如此。但是，一旦涉及需要運氣、技巧和天才意外顯現的基礎研究時，進展較像是在一大段時間內的「間斷性平衡」（punctuated equilibrium），期間沒有什麼大事發生，卻忽然有了突破，整個領域驟然改觀。如果我們觀察基礎研究的歷史，從牛頓到愛因斯坦到今天，我們可以看到間斷性平衡可以正確地描述進步的方式。

第五，如同我們所有已見到的大腦逆轉工程研究，由於計畫的龐大規模和極其巨大的費用，整個計畫可能拖延到本世紀中期。然後，要使所有的資料產生意義，可能還要花好幾十年。所以我把大腦逆轉工程的完成時間設定在本世紀之末。

第六，機器人突然產生意識，發生「大爆炸」的事將不會發生。如同我們在前面所界定的「意識」，它包含透過模擬未來以便為未來作計畫的能力，因而意識也有等級的高低之分。機器人將在此一量表上慢慢往上爬，因而給了我們足夠的時間做準備。我相信機器人爬到最高點的時間將在本世紀末發生，因而我們還有足夠的時間來討論我們可做的選擇。還有，機器內的意識，可能另有其特性。所以一種「矽晶意識」（silicon consciousness）的形式（而非純粹人類意識）將會先發展出

來。

如此又引發另一個問題。雖然有許多機械性的方法可以增強我們的身體，另外還有生物性的方式能達到同樣的效果。但事實上，進化的完全突破就是較佳基因的選擇，因而，我們何不靠走捷徑來避開數百萬年的進化，並嘗試去控制我們的遺傳命運？

譯注1：秀麗隱桿線蟲是一種可以獨立生存的線蟲，長度約一公釐，生活在溫度恆定的環境。

第三章　醫學的未來——完美與超越

沒有人真的有勇氣敢這樣說，但如果了解如何增加基因可以創造出更好的人類，我們為什麼不做？

——詹姆斯‧華生，諾貝爾生醫獎得主

我的確不認為，在本世紀內，我們的身體還會保留什麼祕密。因而，任何我們能想得到的事，都可能實現。

——大衛‧巴爾的摩，諾貝爾生醫獎得主

我不以為時機剛剛好，但已經非常接近。不幸的是，恐怕我自己正好屬於會死亡的最後一代。

——傑拉爾德‧薩斯曼（Gerald Sussman）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

基因組醫學／造訪醫生／幹細胞／克隆／基因治療／與癌症共存

世紀中期（二○三○—二○七○）

基因療法／訂做的孩子／大力老鼠基因／生物科技革命的副作用

遙遠未來（二○七○—二一○○）

逆轉老化／卡路里限制／青春之泉？／我們一定會死嗎？／生物時鐘／永生又青春／人口、食物和污染／世界人口的一些希望／復育消失的生命形式／重現尼安德塔人？／讓猛象重現？／侏羅紀公園？／創造新的生命形式／禁止所有的疾病？／美麗新世界／細菌戰爭

神話中的諸神擁有終極的力量：決定生與死的力量，以及治癒疾病和延長生命的能力。我們最想對諸神祈求的是免於病痛。

在希臘與羅馬神話中，有一個黎明女神依歐斯（Eos）的故事。有一天，她與凡間俊美的提索那斯（Tithonus）墜入愛河。她擁有完美的身體與永恆的生命，但提索那斯卻要面臨衰老和死亡。她決定解救愛人，讓他免於淒涼的命運，就懇求眾神之父宙斯（Zeus），特許提索那斯永生，以便他們可以長相廝守。宙斯對這兩個愛人感到同情，就實現了依歐斯的願望。

但依歐斯太心急，忘了為提索那斯請求永遠的青春。因而他雖得不死，身體卻日益衰老。他死不了，卻愈來愈衰弱，永遠伴隨著痛苦活著。

所以，這就是二十一世紀科學所面臨的挑戰。科學家現在正閱讀著生命之書，其中有人類完整的基因，也允許我們對老化的了解，獲得奇蹟似的進展。但，生命若延長而無健康與活力，可能如同提索那斯的悲劇一般，成為永久性的懲罰。

到了本世紀末，我們也將擁有許多神話般的左右生與死的力量。但這個力量不會只限於療癒疾病，而是會用來增強人類的身體，甚至創造出新的生命形式。不過，它將不會透過祈禱和魔法來達成，而是透過生物科技的奇蹟。

羅勃特‧藍札（Robert Lanza）是解開生命祕密的科學家中的一員。他是一個很忙碌的人，他也是生物學界的新血，年輕、有活力，還有很多新點子——很多突破性想法有待研究證實，因而總是時間不夠用。他正處身於生物科技改革浪潮的峰頂。就像一個小孩走進糖果店，他興奮地想嘗試每一未知的領域，在很多熱門題目中獲得突破。

在一世代或兩世代以前，研究的步調則大大不同。你可以看到生物學家悠閒地檢驗無名的小蟲，耐心地研究牠們的解剖細節，並為牠們苦思拉丁文名字。

但藍札不是這樣的人。

某日我與他在播音間接受訪問時相遇。我立刻注意到他的年輕和無邊際的創造力。一如平常，他同時趕做著許多研究。他告訴我，在這進展神

速的領域，他以一個不尋常的方式出發。他來自南波士頓的一個中等工人階級家庭。但是在高中時代，他聽到有關解開去氧核糖核酸（DNA）的驚人消息。他被迷住了。他決定進行一個科學計畫：在他的房間內複製一隻雞。他的父母雖然對此感到困惑，不知道他在幹什麼，卻也給他支持。

為了使自己的計畫有一個成功的開始，他去哈佛大學尋求指點。他不認識任何人，就向一個他以為是看門人的人詢問。這個看門人很好奇，就把他帶到自己的辦公室。藍札後來發現，這個看門人其實是實驗室中的資深研究員之一。他被這個來自高中的可畏後生所打動，就把藍札介紹給那裡的其他科學家，其中有許多研究員都曾獲得諾貝爾獎同級的獎項。此後這些人改變了藍札的一生。藍札將自己比做電影《心靈捕手》（Good Will Hunting）中麥特‧戴蒙（Matt Damon）扮演的角色——一個衣衫不整、但有街頭生活智慧的工人子弟，以他的數學天分，把麻省理工學院的教授搞得七昏八素，讓他們感到訝異。

今天，藍札是先進細胞科技公司（Advanced Cell Technology）的科學主管，他掛名的論文和發明有好幾百項。二○○三年，聖地牙哥動物園請他從一個二十五年前死亡的屍體複製出一隻爪哇野牛（bantang，野牛中較危險的一種），使他上了報紙頭條。藍札成功地從屍體中抽取有用的細胞，處理以後，將它們送到猶他州的一個畜牧場。在那裡授精細胞被植入母牛。十個月後，接到消息說，他的最新創作已經誕生。有一天，他將會進行一種「組織工程」——這種工程最終會創造出人類肢體零售店，讓我們在其中訂購新的由我們的細胞培養出來的器官，以便替換生了病或破舊的器官。還有一天，「組織工程」可能會進行人類胚胎細胞的複製。藍札曾是為了產生胚胎幹細胞的目的，而複製世界上第一個人類胚胎的歷史性隊伍的成員之一。

醫學三階段

被禁錮於DNA內的知識被解開韁繩以後，激發了一個新發現的大浪潮，而藍札就在上面衝浪。從歷史的角度來說，醫學的發展有三個階段。第一階段持續數萬年，醫療被迷信、巫術以及傳聞所支配。多數嬰兒出生時就走向死亡，平均壽命徘徊在十八歲至二十歲之間。某些有用的藥草和化學成分在此時期被發現（例如阿斯匹靈），但大致上並無探尋新治

療的系統方法。「醫生」以討好富有的病人來賺取收入，並將保有藥方和咒語視為個人的重大利益。

在此一時期，梅奧診所（Mayo Clinic）的創辦人之一，在為病人查房時保存了一份私人日記。他率直地寫道，在他的黑色袋子裡只有兩種有效成分：鋼鋸和嗎啡。鋼鋸用來鋸掉生病的肢體，而嗎啡則是用來殺死截肢時的痛苦。它們每次都有效。除此之外，它的黑袋子裡只有蛇油和狗皮膏藥。他為此沮喪地嘆息。

醫學的第二階段始於十九世紀，那時細菌理論興起，公共衛生也改善了。十九世紀的美國，平均壽命上升至四十九歲。當成千上萬的士兵死於第一次世界大戰歐洲戰場時，醫生有迫切的需要去做真實的實驗（實驗的結果可以複製），並將成果刊登於醫學期刊。歐洲的國王們，因為手下最優秀和最聰明人才的被殺而感到恐懼，也要求有效的治療而非騙術。當時的醫生不再嘗試取悅富有的主子，而是透過刊登論文於同儕評論的期刊，以贏取正統性與名聲。這點為抗生素及疫苗的進展設定了舞台，而平均壽命也提高至七十歲以上。

醫學的第三階段是分子醫學。我們見到物理和醫學的融合，降低醫藥至原子、分子以及基因。這個歷史性轉型，始於一九四○年代，當時奧地利物理學家薛丁格（量子論的創始人之一）寫了一本有影響力的書——《生命是什麼？》（What Is Life?），他否定了某種神祕靈魂（或生命力）將生命賦予生物的想法。相對的，他猜測所有的生命都是基於某種形式的編碼，而這些密碼就是寫在分子之上。他推測，只要找到那個分子，我們就可以弄清楚生命的祕密。物理學家法蘭西斯‧克里克受到薛丁格的書的啟發，和遺傳學家詹姆斯‧華生共組團隊，以證實DNA就是這個傳說中的分子。一九五三年，在這個有史以來最重要的發現之一，華生和克里克揭開了DNA的結構祕密——一個雙螺旋。攤開來以後，單一的一串延伸大約六英尺。它上面含有一連串的三十億個攜帶密碼的核酸，分別稱為A、T、C、G（adenine,thymine,cytosine,guanine）。只要正確地閱讀排列在DNA分子上的核酸序列，我們就能閱讀這本生命之書。

分子遺傳學的迅速進展，終於導致「人類基因組計畫」的誕生——真正稱得上是醫學史上的里程碑。這個大規模地為人體全部基因排序的計畫，花費大約三十億美元，並有來自全世界的數百位科學家合作參與。

當它終於在二○○三年大功告成時，也就預告著一個科學的新紀元。最終，每一個人在需要時，都能取得存放於光碟中的個人基因組。它將會列出你所有的大約二萬五千個基因；它將是你自己的「使用者手冊」。

諾貝爾獎得主大衛‧巴爾的摩的話可以作為總結：「今日的生物學是一種資訊科學。」

世紀初期（現在—二○三○）

基因組醫學

醫學的爆發性成長，背後的驅動力有一部分來自量子論和電腦革命。量子論已經給我們一些令人驚奇的詳細模型，可以顯示原子在單一蛋白質和DNA分子裡如何安排。從無到有，一個原子接一個原子，我們知道了分子如何組成。而基因的排序（那向來是冗長乏味而又昂貴的過程）工作，現在也都是以自動化的機器人完成。原來，要為單一人類身體的全部基因排序，就要花數百萬美元。由於實在太過昂貴和費時，只有少數人（其中包括使此一技術達到完美的科學家）的基因組被解讀出來。但只要再過數年光景，這個奇特的科技將可應用到每一個人身上。

（我清楚地記得，一九九○年代後期，我在德國法蘭克福的一個有關未來醫學的會議擔任主講人。我預測，到了二○二○年，個人的基因組將可能實現，每個人都會持有一片光碟或晶片，而有關他或她的基因描述就在其中。但是有一位與會者感到很憤怒。他站起來說，這個夢想不可能實現。理由很簡單——基因數量太大，要提供平常人個人基因組的資料代價實在太高。「人類基因組計畫」花了三十億美元，為個人基因排序的成本不可能降低很多。其後我與他討論這個問題，漸漸地了解問題所在。他以線性模式思考。但是摩爾定律會降低費用，使得用機器人、電腦以及自動化機器來為DNA排序成為可能。他未能了解摩爾定律對生物學的深切影響。回顧那一個事件，我現在了解，如果當時的預測有錯誤的話，那就是我過度高估了提供個人基因組所需要的時間。）

以史丹佛工程師史蒂芬‧奎克（Stephen R.Quake）為例，他已經使最近的基因排序發展趨近完美。他已經將成本壓低到五萬美元，並預期在未來數年內驟降至一千美元。長久以來，科學家都在猜想，當人類基因排序的價格降至一千美元時，可能打開大量基因排序的大水閘，多數人將

可受惠於此一科技。數十年內，你所有基因的排序費用可能低於一百美元，不會比標準的血液檢測昂貴。

（最新的突破關鍵來自找到捷徑。奎克將一個人的DNA與其他已經做好基因排序的人的DNA做比較。他先將人類基因組拆解成三十二位元的DNA單位。然後用電腦程式比較這些三十二位元的斷片與其他人的完整基因組有何不同。由於任何兩人的基因幾乎全部相同，相異的部分不到百分之○·一，這意味著電腦可以快速比對這些三十二位元的片斷。）

奎克成為世界上第八個基因組全部完成排序的人。這個計畫與他的個人利益相關，因為他要檢驗自己的基因組中有關心臟病的證據。不幸的是，他的基因組顯示出，他的遺傳中有一個基因版本與心臟病有關。他嘆口氣說：「當你要檢視自己的基因組時，還得有很大的勇氣呢！」

我能體會那種怪異而又令人恐懼的感受。為了主持BBC的電視節目，我曾經接受部分的基因檢驗，並將資訊儲存於光碟中。一個醫生從我的手臂上抽出一些血，把它送至范德堡大學的實驗室，兩週後，一張光碟被郵寄回來，其中列出我的數千個基因。光碟片在手，知道其中含有我身體的部分藍圖，為我帶來古怪的感覺。大致而言，這個光碟片可以用來製造出一個大致差不多的我自己。

但那也激起我的好奇，因為我的身體祕密，就裝在那片光碟裡。例如，我可以看看我有沒有一種會使我增加罹患老年失智症機率的基因。我很關心這一點，因為我母親就是死於老年失智症。（幸運的是，我沒有這個基因。）

還有，我有四個基因，與世界上數千個曾做基因檢測的人的基因組相符。然後這些基因與我的四個基因完全相符的人的地理位置，被標示於地圖上。分析地圖上的這些分布點，我可以看到一條點狀路徑，起源於西藏附近，然後延伸到中國和日本。這真是神奇，這個路徑可以追溯我母親的祖先的遷移類型，直到數千或好幾萬年前。我的祖先沒有寫下任何他們遠古的遷徙資料，但是洩漏他們旅行內情的地圖卻蝕刻於我的血液與DNA中。（你也可以追蹤你的父系先人。粒線體基因由母親不變地傳給女兒，而Y染色體則由父親傳給兒子。因此，透過基因的分析，人們可以追溯母系或父系的祖先。）

在我想像中，不久的將來，許多人也都會有與我相同的奇異感受，把他

們自己的身體藍圖拿在手上，閱讀著潛伏在基因組裡的私人祕密（包括危險的疾病），以及他們的祖先在古代的遷移類型。

但是，對於科學家來說，這個發展打開一個全新的科學分支——稱為生物資訊學，或使用電腦快速掃描並分析數以千計的有機組織的基因組。例如，把數百個承受某種病痛的人的基因組輸入電腦中，人們可以計算出受損傷的DNA的精確位置。事實上，世界上某些最強大的電腦，就是在從事生物資訊學的工作，分析在動物和植物中發現數以百萬計的基因，去發現某種關鍵性的基因。

這甚至能使電視上的偵探節目（如《CSI犯罪現場》）產生革命性改變。只要提供一點點DNA（在頭髮毛囊、唾液或血跡），人們不但能決定這個人的頭髮和眼睛的顏色、族裔、身高和醫療歷史，還可能決定他的面貌。今天，警方的藝術家只能用被害人的頭顱，塑造出接近的面容。未來，只要提供一個人的一些頭皮屑或血液，電腦將可能建構出這個人的面容。（同卵雙胞胎面貌極度相似的事實，意味著基因本身，即使在有環境因素出現的情況下，依然可以決定一個人面貌的大部分。）

造訪醫生

如同我們在前面幾章所說，看醫生的方式將會有根本的改變。當你與牆上螢幕的醫生交談時，你可能是在與軟體對談。你的浴室將會比現代醫院有較多的感應器，在癌症細胞成為腫瘤以前好幾年，就悄悄地偵測著它。例如，大約百分之五十的所有普通癌症牽涉到基因p53（一種腫瘤抑制基因）的變異，而它會很容易就被這些感應器偵測出來。

如果證實有癌症，就會有奈米粒子注射進入血液中，它將會像精靈炸彈一般，直接把抗癌藥物輸送到癌症細胞。我們將會看待今日的化療，一如我們看待上世紀的水蛭療法一般。（下一章將更詳細地討論到奈米科技、DNA晶片、奈米粒子以及奈米機器人。）

如果這個牆面螢幕上的「醫生」無法治療某一器官的疾病或傷害，你會乾脆再生產一個器官。在美國，現有九萬一千人在等待器官移植，每天有十八人因等不到器官而死亡。

如果你的虛擬醫生發現某種不尋常的現象（如器官生病），它將為你訂

購一個新的器官，由你的細胞直接培養出來。「組織工程」乃是醫學中最熱名的領域之一，它使「人體商店」成為可能。目前科學家能夠在實驗室中，以你的細胞培育出皮膚、血液、血管、心臟瓣膜、軟骨、骨骼、鼻子和耳朵。第一個重要器官（膀胱），於二○○七年培養成功。第一個氣管是在二○○九年。到目前為止，培養出來的器官相對而言還很簡單，只包含少數類型組織和少數結構。五年內，第一個肝臟和胰臟將會出現，對公共衛生將有重大影響。諾貝爾生醫獎得主沃爾特‧吉爾伯特（Walter Gilbert）告訴我，他預見有那麼一天，大約是在未來數十年，實際上人類身上的每一個器官都將由自己的細胞培養出來。

透過組織工程培養新器官，首先要從你的身體抽取一些細胞。然後將這些細胞注射到一個像是海綿形器官的可塑模型，樣子就跟出了問題的器官一樣。這個可塑模型是由可被生物分解的聚乙醇酸（polyglycolic acid）做成。這些細胞由某些生長因子處理，以刺激細胞成長，引導它們在模型裡成長。最後，模型分解，留下一個完美的器官。



圖說：未來，我們會擁有如同《星際爭霸戰》中的「三度儀」，可以診斷出幾乎所有的疾病；而可攜式磁振造影機和DNA晶片，將使這一點成為可能。（Bruno Vinont/Getty Images）

我有機會訪問在北卡羅來納州維克森林大學（Wake Forest University），安東尼‧阿塔拉（Anthony Atala）的實驗室，親眼看到這

個奇蹟似的科技。當我走過這個實驗室時，看到一些裝著人類活器官的瓶子。我可以看到血管和膀胱；我看到不斷開合的心臟瓣膜——因為有液體被注入通過它們。看著這些瓶中的人體活器官，我彷彿走進了科學怪人的實驗室，但這裡有幾個重要的不同之處。回到十九世紀，醫生不了解人體的排斥作用，因而器官移植無法成功。還有，醫生也不知如何阻止感染，因此手術後無法避免任何器官被污染。但現在，阿塔拉不會創造出怪物，而是開創一種完全創新的解救生命的醫學科技，有朝一日將會改變醫療的面目。

未來，也許在五年之內，他的實驗室的目標之一是培養出人類的肝臟。肝臟不太複雜，只含有少數類型的組織。實驗室培養的肝臟可以解救萬千生命，特別是那些急需肝臟移植的人。它也能解救因酒精中毒而硬化的肝臟。（不幸的是，知道了器官損毀還可以更換，也會鼓勵人們保留惡習。）

如果現在可以培養身體的器官（如氣管和膀胱），什麼因素會阻礙科學家培養身體的每一個器官？一個基本的問題是：如何長出提供細胞血液的微血管（capillary）？人體內的每一個細胞都需要與血液供應相連接。還有，長出複雜的結構也是問題。負責清除血液中毒素的腎臟，由數百萬個細小濾管器組成，所以這些過濾器的模型很難做出來。

但是，最難培養的器官是人類大腦。雖說再創造或培養出人腦似乎還要再過數十年，但也許可以將年輕的細胞直接注射進入大腦，大腦會將它們納入神經網絡之內。不過，這種新腦細胞的注射是隨機性的，因而病人必須重新學習許多基本的運作。但因為大腦有其「可塑性」——也就是在學習新的事物以後，持續不斷地重新連結它自己——它應當有能力把新的細胞整合起來，使它們能正確運作。

幹細胞

超越這個問題的一步就是應用幹細胞技術。目前，人體器官不是用幹細胞來培養，而是用特定接受治療器官的細胞在模型裡培養。在不久的將來，有可能直接採用幹細胞。

幹細胞是「眾細胞之母」，有能力變成身體內任何類型的細胞。我們體內的每一個細胞都含有創造整個身體所需的完整基因密碼。但當我們的

細胞成熟時，它們完成分化，因而許多基因沒有啟動。例如，皮膚細胞雖有可以轉為血液的基因，當胚胎細胞變為成人細胞時，這些基因就被關閉了。

但是胚胎幹細胞在存活期間，仍然保有再生任何類型細胞的能力。雖然科學家對胚胎幹細胞的評價很高，但它也較有爭議性，因為胚胎必須被犧牲，才能抽取這些細胞，因而產生倫理問題。（不過，藍札和他的同僚已經帶頭研發一些方法，把已經轉變成單一形態的細胞的成熟幹細胞，轉變成胚胎幹細胞。）

幹細胞有潛力可以治癒許多疾病，例如糖尿病、心臟病、老年失智症、帕金森氏症，甚至癌症。事實上，我們很難想像出，哪一種疾病不會受到幹細胞的重大影響。一個特別的研究領域是脊椎神經傷害——它曾被認為完全無法治療。一九九五年，當飾演超人的英俊演員克里斯多福‧李維（Christopher Reeve）遭受嚴重的脊髓傷害時，他完全癱瘓，無法醫治。不過，在動物研究中，以幹細胞修補脊椎神經已有重大進展。

例如，科羅拉多大學的斯蒂芬‧戴維斯（Stephen Davies），成功地治療老鼠的脊椎神經傷害，就令人印象深刻。他說，「我所做的幾個實驗，就是把成熟的神經細胞直接植入成熟的中央神經系統。這有點像科學怪人影片中才有。但是令我們大大驚訝的是，成熟的神經細胞在一星期內，就能將新的神經纖維由大腦的一邊送到另一邊。」在治療脊椎傷害中，普遍認為任何對神經的修補都將造成極大的痛苦。戴維斯發現，一種類型的關鍵性細胞——被稱為「星狀膠質細胞」（astrocyte）——有兩種變異，結果完全不同。

戴維斯說：「只要使用對的星狀膠質細胞去修補脊髓傷害，我們便會取得所有成果而無痛苦。若用另一種星狀膠質細胞，結果剛好相反，有痛苦而無成果。」他也相信，他所領先開發的幹細胞技術，同樣能應用於中風、老年失智以及帕金森氏症的病人。

由於改變胚胎幹細胞，就能創造出幾乎所有的身體細胞，可能性無窮。不過，明尼蘇達大學心血管修護中心主任多麗絲‧泰勒（Doris Taylor）提醒說，還有很多研究有待完成。她指出：「胚胎幹細胞代表好的、壞的和醜陋的。當它們是好的時，它們可以在實驗室大量培養，並用來長成組織、器官或身體的一部分。當它們是壞的時，它們不知何時停止生

長，因而長成腫瘤。至於醜陋的部分——就是，我們不知所有的線索，所以無法控制結果，在沒有更多的實驗研究以前，我們還沒作好準備使用它們。」

這就是幹細胞研究所面臨的主要問題之一：這些幹細胞，在沒有外在的化學訊息影響下，會繼續激烈地繁殖，直到變成腫瘤。科學家現在了解，有一種微妙的化學訊息在細胞之間旅行，告訴它們何時和何處去生長或停止生長，這種訊息與細胞本身一樣重要。

不過，現在已經有一些緩慢但真實的進展，特別是在動物研究中。二○○八年泰勒的團隊有史以來第一次從無到有地培養出一個會跳動的老鼠心臟，上了新聞頭條。她的團隊從一個老鼠心臟開始，將心臟裡的細胞溶解，留下心形的蛋白質支架。然後他們將一些含有心臟幹細胞的混合物塗在支架上，接著觀察幹細胞開始在架子內繁殖的情形。在這以前，科學家能夠在培養皿上長出個別的心臟細胞。但這是第一次從實驗室培養出來的真正會跳動的心臟。

對她而言，培養心臟也是一件很興奮的事。她說，「實在棒透了，你看到了整個血管樹——從動脈到將血液輸送到每一個心臟細胞的微血管。」

美國政府也有一個部門，對造成組織工程這個領域的突破保持高度興趣，那就是美國軍方。在過去的戰爭中，戰場上的死亡率很可怕，軍隊一大批又一大批被殺死，還有很多人因受傷而死。現在快速反應醫療撤退小組，將傷兵從伊拉克與阿富汗以飛機送往歐洲或美國，在那兒接受第一流的治療。美國軍人的存活率急速上升。但還有很多士兵失去手臂和其他肢體。因此，美國軍隊的優先是：找到將肢體長回來的方法。

在國防再生醫學研究院所（Armed Forces Institute of Regenerative Medicine）達成的一項突破中，已經使用完全創新的方法來培養器官。科學家早已知道蠑螈有驚人的再生能力，一部分肢體失去了，可以完全再長回來。肢體能夠再長回來，是因為蠑螈的幹細胞受到刺激。一個已見成效的理論，已由匹茲堡大學的斯蒂芬‧巴迪拉克（Stephen Badylak）進行探討，他已經成功地使指尖再生。他的團隊已經以再生組織的神奇力量創造了「精靈粉末」（pixie dust）。這個粉末不是由細胞產生，而是由存在於細胞間的細胞外基質（extracellular matrix）所造成。這個基

質非常重要，因為它含有告訴幹細胞依特定方式生長的訊號。當這種精靈粉末塗在已被削掉的指尖後，它不但會刺激指尖而且也刺激指甲，留下原有手指的完美複本。以這種方式，最長曾經長出三分之一英吋的組織。下一個目標是延長這個過程，看看整個人類肢體能否如同蠑螈一般再生出來。

克隆

如果我們能夠培養人體的各種器官，那麼我們能夠再長出一個完整的人，創造出一個完全的基因複本（一個克隆人）嗎？答案是：原則上能，但這件事還沒做過，雖然無數報告的結論都是反面的。

克隆（即無性繁殖、複製）是好萊塢電影偏好的主題，但它們往往使科學倒退。在電影《魔鬼複製人》（The Sixth Day）中，阿諾‧史瓦辛格（Arnold A.Schwarzenegger）所演角色，與擅長複製人類的壞蛋作戰。更重要的是，他們擅長複製人的整個記憶，然後把它灌進複製人。當史瓦辛格致力除去一個壞人時，另一個有相同人格和記憶的新人已經誕生。更糟的是，他發現有一個複製人是以他為對象複製，而沒有他的知識。（在真實情境中，當一隻動物被複製時，記憶不會被複製。）

一九九七年，當愛丁堡大學羅斯林研究所的伊恩‧威爾穆特（Ian Wilmut）複製出桃莉羊時，克隆的觀念成為世界性的大標題。由一隻成年的羊取出一個細胞，除去細胞核中的DNA，然後將這個細胞核注入一個卵細胞。威爾穆特成功地完成把原始基因恢復的功績。我曾問過他，他有沒有預期到，這個歷史性的發現會引發媒體大爆發？他說沒有。他完全明白他的成果在醫學上的重要性，但低估了大眾對這個成果的著迷程度。

很快地，世界各地很多團體開始模仿他的成果，複製各種動物，包括老鼠、山羊、貓、豬、狗、馬以及牛。我曾一度和BBC的攝影隊伍，到德州達拉斯郊外訪問羅恩‧馬爾奎斯（Ron Marquess）。他擁有美國最大的複製牛農場。在牧場中，我很吃驚地看到了第一、第二，甚至第三代的複製牛——由複製牛複製再複製的牛。馬爾奎斯告訴我，他們有必要發明一個新辭彙，來追溯不同代的複製牛。

一群牛吸引了我的眼睛。我看到了八隻樣子相同的牛排成一列。他們精

確地成排走著、跑著、吃著以及睡著。雖然小牛不知道他們是互相複製的牛，但是牠們本能地聚在一起，也模仿著彼此的動作。

馬爾奎斯告訴我，複製牛是潛在的獲利豐厚事業。如果你有一隻體態超強的公牛，用來育種，將可賣得好價錢。但如果這隻公牛死了，牠的基因就會斷了線，除非事前收集牠的精液冷藏起來。若用複製技術，則可讓有價值的公牛的遺傳品系永遠存活。

雖然複製有其動物與畜牧業方面的商業應用，對人類的應用則較不明朗。雖說已有許多聳動的聲明說複製人已經成功，但可能全部都是虛假的。目前為止，還沒有人成功地複製出一隻靈長類動物，更別說是人類了。由於培養數百個胚胎中，難得會有一個是全程發展健全的，且其餘都會有缺陷，所以即使是動物的複製也已證明非常困難。

即使人類複製成為可能，也會有社會障礙。首先，許多宗教會如同一九七八年天主教會反對試管嬰兒的方式一般，反對人類複製。那時路易絲‧布朗（Louise Brpwn）成為歷史上第一個在試管中受孕的嬰兒。這意味著限制此一科技的法律可能被通過，或者至少縮緊規範。其次，人類複製的商業需求將不多。即使合法，頂多只有一小部分人類會被複製。畢竟，以同卵雙生（或同卵三胞胎）的形式出現，我們已經有過複製，所以人類複製的新奇性將會逐漸淡化。

當初，試管嬰兒的需求極為龐大，是由於不孕夫婦數量實在很多。但是，誰需要複製一個人？也許是為失去孩子而傷痛的父母。或者，更可能的是一個富有的、在病床上而無繼承人（或沒有特別喜歡的繼承人）的老人，並留遺囑以孩子的名義把所有的錢給他自己，以便人生重新來過。

所以在未來，即使會通過法律限制，人類複製可能會存在。不過，他們將只占人類的一小部分，所產生的社會影響也很小。

基因治療

美國國家衛生研究院現任院長，也是政府的歷史性「人類基因組計畫」的領導人佛朗西斯‧柯林斯（Francis Collins）告訴我：「所有的人，都有半打很糟糕的基因。」在古代，我們毫無選擇，只能承受這些非常可

能致命的基因缺陷。而他告訴我，在未來我們將會透過基因工程治癒大部分。

從人類歷史的黎明期開始，遺傳疾病就已經困擾著人類，其中有一些關鍵性時刻，事實上也影響了歷史的進程。例如，歐洲皇族往往同系通婚，使得遺傳疾病禍延好幾代貴族。以英國的喬治三世為例，很可能承受著嚴重的間歇性紫質症（porphyria）的痛苦，會有暫時性的精神錯亂。有些歷史學家懷疑，這種疾病使他與殖民地的關係惡化，刺激他們於一七七六年宣布從英格蘭獨立出來。

維多利亞女王（Queen Victoria）帶有會導致失血過多的血友病基因。因為她有九個子女，其中多人與其他歐洲王室聯姻，這也使「皇家疾病」擴及歐州大陸。在俄羅斯，維多利亞女王的外曾孫、同時也是尼古拉二世之子的亞歷克西斯（Alexis），罹患了血友病。這種病有時似乎可以被神祕主義者拉斯普丁（Grigori Rasputin）短暫控制。這位「瘋僧」因而獲得了足以癱瘓俄羅斯貴族的權力，也延擱了急切需要的改革。有些歷史學家猜想，他也幫忙帶來一九一七年的布爾什維克革命。

但在未來，基因療法將能治癒許多種已知的遺傳性疾病（約五千種），如折磨北歐人的囊性纖維症（cystic fibrosis）、侵襲東歐猶太人的家族黑蒙性癡呆症（Tay-Sachs），以及侵襲非裔美人的鐮狀細胞（sickle cell）貧血。在不久的將來，許多這類單一基因突變的遺傳性疾病將可能治癒。

基因療法有兩種類型：體細胞基因治療和生殖細胞基因治療。

體細胞基因治療涉及單一個體的損壞基因的修補。當個體死亡時，治療的效果就消失了。較引起爭議的是生殖細胞基因治療，修補的對象是生殖細胞的基因，因而被修補的基因幾乎都會永遠地傳給下一代。

治療基因性疾病遵循漫長但廣被接受的歷程。首先，我們必須找到某種基因性疾病的病人，然後費力地追蹤他們的家譜，直到好幾代以前。透過對這些人基因的分析，然後試圖精確地決定這個基因可能的損傷位置。

然後取出一個健全的基因版本，將它注入一個「帶菌者」（通常是一個無害的病毒），再將它注射到病人身上。這個病毒很快的將「好基因」

崁入病人的細胞，可能就治好了有這個疾病的病人。到二○○一年為止，有超過五百種基因療法在試驗或覆審階段。

不過，進展一直很緩慢，效果好壞不一。問題之一是，身體往往無法分辨，這是一個無害的、帶有「好基因」的病毒，還是一個危險的病毒，於是就開始攻擊它。這點所帶來的副作用，使好基因歸於無效。另一個問題是，沒有足夠的帶有好基因的病毒被正確地放進標靶細胞，所以身體無法產生足夠且適當的蛋白質。

即使有這些複雜問題，法國的科學家於二○○○年宣布，他們能夠治療罹患嚴重複合型免疫缺乏症（SCID）的兒童——這些孩子天生沒有能發揮作用的免疫系統。某些SCID病人——像泡沫男孩大衛（David the bubble boy），一輩子都要生活於無菌的塑膠氣泡中。沒有免疫系統，任何疾病都可能致命。在進行治療後，這些病人的基因分析顯示，他們身體裡的免疫細胞的確按照計畫與新細胞合作，啟動了他們的免疫系統。

但是，也有挫敗的時候。一九九九年在賓州大學，一個病人死於基因治療試驗，引發醫學社群的真摯反省。那是進行此種類型基因治療的一千一百個病人中第一個死亡病例。直到二○○七年，那些曾經被治療某一特定形式的SCID病人，十個人中有四個發展出嚴重的副作用——白血病（leukemia，俗稱血癌）。有關SCID的基因治療研究，現在集中在治癒疾病而避免意外啟動會導致癌症的基因。目前，有十七個罹患各種類型的SCID病人，完全遠離SCID和癌症，使它成為這領域的少數成功範例。

有一個基因療法的標的事實上是癌症。幾乎有百分之五十的普通癌症與一個損壞的基因p53相關。這個p53基因長而複雜，可能因此使它較容易受到環境的或化學的因子傷害。所以，很多基因治療實驗，都在進行將健全的p53基因注入病人體內。例如，香菸的霧氣往往在p53基因內的三個我們熟知的地方導致典型的變異。因此可能有一天，我們能透過替換損壞的p53基因，來治癒某些類型的肺癌。

進展雖慢，但很穩定。二○○六年，在馬里蘭州的國家衛生研究院，可以透過修改殺手T細胞，讓它們針對癌細胞做攻擊，成功地治療轉移性黑色素瘤（metastatic melanoma）——這是一種皮膚癌。這顯示基因療

法可以成功地用來對抗某些類型的癌細胞的第一個研究。同樣在二○○七年，在倫敦的大學學院（University College）和摩爾眼科醫院（Moorfields Eye Hospital），也能用基因療法治療某些類型的遺傳性視網膜疾病（由RPE65基因的變異引起）。

同時，有些夫婦不等待基因治療，而是自行掌握他們的基因遺產。一對夫婦可以用試管內授精創造出一些受精胚胎。每一個胚胎可以測試一種特定的疾病，而這對夫婦可以選擇沒遺傳性疾病的胚胎植入母體。以此方法，可以不用昂貴的基因療法而逐漸除去遺傳性疾病。這個過程現在已經應用在布魯克林的一些正統派猶太人身上，他們是家族黑蒙性癡呆症的高危險群。

不過，有一種疾病可能到了世紀結束，還維持致命性——那就是癌症。

與癌症共存

回到一九七一年，尼克森（Richard Nixon）總統大張旗鼓地鄭重對癌症宣戰。他相信，只要投入大筆金錢，癌症的治癒指日可待。但是經過了四十年，花費了兩千億美元，癌症依然是美國第二大死亡原因，占死亡人數的百分之二十五。從一九五○年到二○○五年，癌症的死亡率只降低了百分之五（依年齡和其他因素修正後）。據估計，光是二○一一年，癌症就將奪走五十六萬二千個美國人的生命，或每天超過一千人。少數類型的癌症罹患率雖有下降，但其他仍居高不下。而癌症的治療，包括以毒攻毒、割除、摧毀人體組織，讓病人飽受折磨。他們不免懷疑：到底是生病比較糟糕、還是治療比較糟？

後見之明使我們發現錯在哪裡。回顧一九七一年，基因工程學的革命尚未啟動，癌症的起因完全神祕。

現在科學家了解，癌症基本上是我們的遺傳疾病。不論是由病毒、化學暴露、放射線或意外所引起，癌症基本上涉及我們的四個或更多的基因突變——正常的細胞「忘記如何死亡」。細胞對於它的繁殖和複製失去控制，無法設限，最終殺死了病人。需要一連串四個或以上的問題基因才能導致癌症的事實，也許能解釋為何癌症往往要在原始事件發生後數十年才會致命。例如，你可能在孩童時代被太陽嚴重灼傷，數十年後，可能就在相同的位置罹患皮膚癌。這意味著它可能要花那麼長的時間等

待其他變異發生，終於使細胞傾向癌症的狀態。

癌症基因的主要類型至少有兩種：原癌基因（oncogenes）和腫瘤抑制基因（tumor suppressors）。它們的作用有如汽車的加速器和煞車。原癌基因在下坡的時候扮演加速器，使車子猛衝失控，允許細胞無限制地複製。腫瘤抑制基因正常時扮演煞車，所以當它受損時，細胞就像無法停止的汽車。

「癌症基因組計畫」（Cancer Genome Project）將針對多數癌症進行基因排序。因為每一種基因都需要將人類基因組重新排序，因此它的規模要比原始的「人類基因組計畫」還大數百倍。

這個久被期待的癌症基因組計畫的某些初步結果，有關皮膚癌與肺癌的部分於二○○九年宣布。結果令人驚訝。威爾康信託桑格研究所（Wellcome Trust Sanger Institute）的邁克‧斯特拉頓（Mike Stratton）說：「我們今日所見，將會使我們對癌症的看法完全改觀。我們不曾看到癌症以這種形式顯現。」

肺癌細胞有驚人的二萬三千處個別的變異，而黑色素瘤則有三萬三千處變異。這表示，一個典型的吸菸者，每吸十五根香煙就發展出一次變異。（肺癌每年殺死全世界一百萬人，多數死因為吸菸。）

我們的目標是為所有類型（超過一百種）的癌症做基因分析。人體內有許多種細胞組織，它們全都可能變成癌組織。而每一種組織又可能有許多類型癌症。每一類型癌症涉及數萬處變異。所以我們需要數十年才能精確地挑出是這些變異中的哪一個，造成細胞機制的混亂。科學家將會針對許多不同的癌症發展出治療方法，但沒有萬靈丹，可以用一種方法治療全部癌症，因為癌症本身就像是很多疾病的總稱。

新的治療方法和處方將會持續進入市場，它們都將用來打擊癌症的分子和基因根源。比較有希望的一部分包括：

☆抑制血管新生療法（antiangiogenesis），或阻塞腫瘤的血液供給，讓它無法生長。

☆奈米粒子，它如同「精靈炸彈」被引導至癌細胞。

☆基因治療，特別是p53基因。

☆只瞄準癌細胞攻擊的新藥物。

☆以新的疫苗對抗會致癌的病毒，例如會導致子宮頸癌的人類乳突病毒。

不幸的是，看來似乎沒有找到癌症萬靈丹的希望，但我們將會以一次前進一步的方式治療癌症。比較可能的情況是，當我們有DNA的晶片遍布於生活環境時，在腫瘤形成前好幾年，就可以隨時監控我們的癌細胞。

如同諾貝爾獎得主大衛‧巴爾的摩所說：「癌症是一支細胞軍隊，以多種方式與我們的治療方法作戰，我確信它們將會繼續把我們留在戰場上。」

世紀中期（二○三○─二○七○）

基因療法

基因療法雖有挫折，但研究人員相信，未來數十年將會有穩定的進展。許多人認為，到了世紀中期，基因療法將成為治療各式各樣遺傳疾病的標準方法。科學家在許多動物研究中所獲得的成功，終將轉進為人體實驗。

目前為止，基因療法把目標集中在單一基因變異引起的疾病。它們將會先被治癒。但許多疾病是多種基因的變異，加上環境中的觸發物引起的。這些疾病的治療困難許多，但它們包含許多重要的疾病，如糖尿病、精神分裂症、老年失智、帕金森氏症以及心臟病等。它們全都顯示限定的基因類型，但沒有單一基因是唯一病因。例如，同卵雙生兄弟中，可能一個正常，而另一個卻罹患精神分裂症。

好幾年來，科學家曾數度聲稱，它們能夠透過某些家族的追蹤研究，挑選出一些涉及精神分裂的基因。不過，糗的是這些結果通常未經其他獨立研究證實。所以這些結果是假的，或者可能有很多基因與精神分裂相關。還有，某些環境因素，似乎也有關係。

到了世紀中期，基因療法的基礎將會相當穩固，至少對單一基因引起的疾病如此。但是病人可能不會以修補基因為滿足，他們會想要改善它們。

訂做的孩子

到了世紀中期，科學家將不再是僅僅修補損傷的基因，而是實際去增強和改進它們。

擁有超人能力的欲望非常古老，根深蒂固於希臘羅馬神話和我們的夢中。偉大的英雄海克力斯（Hercules）——最著名的希臘羅馬神話半人半神的諸神之一——不是從運動和特定飲食獲得力量，而是由於神聖基因的注入。他的母親阿爾克美涅（Alcmene）是一個美麗的凡人。有一天她吸引了最高天神宙斯的注意。宙斯假扮成她丈夫與她做愛。當她懷了孩子以後，宙斯宣布，這個孩子有一天會成為偉大的戰士。但宙斯的妻子希拉（Hera）忌妒起來，祕密設計延擱孩子的出生以殺害她。阿爾克美涅在拖長的分娩過程中受盡痛苦，幾乎死去。但希拉的計謀在最後一分鐘暴露了，阿爾克美涅生出了一個不尋常的巨嬰。半人半神的海克力斯從父親獲得神力的遺傳，去完成英雄的、傳奇的事蹟。

未來，我們也許無法創造出神的基因，但我們一定能創造出可以給我們超人能力的基因。如同海克力斯的難產，要讓這種科技產生成果，將要克服許多困難。

約在世紀中期，「訂做的孩子」將會實現。如同哈佛大學生物學家威爾遜（E.O.Wilson）曾說：「智人（homo sapiens），第一個真正自由的物種，即將從自然選擇（造成我們的力量）中退役……很快地，我們必須向內深深檢視，並決定我們希望變成什麼。」

科學家已經梳理出控制基本作用的基因。例如，增進記憶力和表現的「聰明老鼠」基因，於一九九一年被分離出來。有聰明基因的老鼠，走迷宮的能力和記憶力都較佳。

普林斯頓大學的科學家，如錢卓（Joseph Tsien）創造了一個品系的修改過基因的老鼠，擁有額外的NB2B基因，這種基因能夠啟動前腦製造神精傳導體甲基天門冬酸（NMDA）。創造者為牠們命名為小犬鼠

（Doggie mice，仿照電視劇《天才小醫生》的角色Doogie Howser命名）。

這些聰明鼠在許多不同的測試中，表現較正常老鼠為佳。如果老鼠被放在一大缸渾濁的水中，牠必需找到藏在水面下的平台才能休息。正常的老鼠會忘記平台的位置，只是在水缸內亂游，而聰明鼠則在第一次嘗試時，就找到通往平台的最短路徑。如果對老鼠顯示一新一舊兩個物體，正常的老鼠不會注意到新的物體。但聰明鼠立刻認出新物體的出現。

最重要的是，科學家了解這些聰明鼠的基因如何發揮作用：它管制大腦的神經突觸。如果你把大腦想成許多高速公路的大集合，那麼突觸就等同於收費站。如果費用過高，汽車不能通過出入口：一個訊息就在腦中停頓了。但如果費用低，於是汽車可以通過，而訊息就在腦中傳送。類如NMDA的神經傳導體降低突觸的通行費，使得訊息可能自由通過。聰明鼠有NR_2B基因的兩個副本，它也轉而幫忙製造NMDA神經傳導體。

這些聰明鼠證實了海柏學習法則：當某些神經通路被增強時，學習就會發生。具體地說，這些通路可以透過控制連接兩個神經纖維的突觸而增強，使信號更容易通過突觸。

這個結果有助於解釋學習的某些特性。人們都知道，老狗較難學習新把戲。科學家在整個動物王國都可以看到這一點。這應可解釋，NR2B基因會隨著年齡而降低活動性。

還有，如同我們早先所見的海柏學習法則，當神經元形成強有力的連結時，記憶力也會創造出來。這應當是真的，因為啟動NMDA接受器創造了強力的連結。

大力老鼠基因

此外，「大力老鼠基因」也被分離出來，它增加肌肉質量使得老鼠肌肉強大。它先在肌肉通常較大的老鼠被發現。科學家現在知道，關鍵在肌肉生長抑制素（myostatin）基因。一九九七年，科學家發現，當老鼠肌肉生長抑制素基因未活動時，肌肉生長快速增加。

其後，當科學家檢查一個大腿和胳臂有不尋常肌肉的新生嬰兒時，另一

個突破又很快地在德國達成。超音波分析顯示，這個男孩的肌肉比正常的大兩倍。透過這個男孩與他母親（一個職業短跑健將）的基因排序，他們發現一個類似的基因類型。事實上，分析男孩的血液，並未顯示肌肉生長抑制素。

約翰霍普金斯大學醫學院的科學家，因此開始積極地與遭受退化性肌肉疾病侵襲的病人聯繫，認為他們可以受益於此一結果。但他們很失望地發現，辦公室的電話半數來自健美運動者，他們想要這個基因使自己強大，而不管後果如何。也許這些健美運動者想到的是阿諾‧史瓦辛格驚人的成功——他承認使用類固醇來快速啟動迅速成功的職業生涯。由於肌肉生長抑制素基因和抑制它的方法引起強大興趣，連奧林匹克委員會都被迫成立特別小組來研究它。相對而言，類固醇較容易進行化學檢驗，而這個新方法則不然，由於涉及基因和它們所創造的蛋白質，因此更加難以偵測。

在針對出生後不在一起生活的同卵雙生孿生子的研究中，發現他們有很多行為特質受到遺傳的影響。事實上，這些研究顯示，大約百分之五十的孿生子的行為受到基因的影響，而另百分之五十則受到環境的影響。這些受到基因影響的特質包括記憶、語言推理、空間推理、處理速度、外向性以及勇於冒險的程度。

即使曾經被認為複雜的行為，現在也被揭露它們的基因根源。例如，大草原田鼠是一夫一妻制。實驗室的老鼠則是雜交制。艾墨瑞大學的拉里‧楊（Larry Young），因為展示了老鼠移植一個來自一隻大草原田鼠的基因以後，變成了一夫一妻，震動了生物科技世界。每一種動物的大腦對與社交行為及配對相關的腦縮氨酸，都有不同版本的特定接受器。楊把大草原田鼠的基因注入老鼠，當作牠的接受器，結果發現老鼠表現出來的行為比較像一夫一妻的大草原田鼠。

楊說：「雖然很多基因可能牽涉到複雜社會行為的演化——如一夫一妻制，……單一基因的表達方式的改變，對這行為的許多成分（如歸屬感）會有影響。」

憂鬱和快樂也可能有其基因根源。長久以來，人們知道有些人即使遭遇悲劇性意外，仍然心情愉快。即使遇到挫折，他們總是看到事情的光明面；換成別人，早就被擊倒。這些人也往往比正常人健康。哈佛大學心

理學家丹尼爾‧吉爾伯特（Daniel Gilbert）告訴我，有一個理論可以解釋這一點。也許我們生來有一個「快樂的設定點」，一天又一天，我們可能在這個設定點周邊擺動，但它的層級早在出生時設定。未來，透過藥物或基因療法，人們也許可以移動這個設定點，特別是對那些長期憂鬱的人。

生物科技革命的副作用

到了世紀中期，科學家將能分離並修改那些分別控制各種人類特質的單一基因。但這並不代表人類可以立即從其中獲益。其中還要有長期而又辛苦的努力，去抹平副作用與不想要的結果，這過程需要數十年。

例如，阿基里斯（Achilles）在戰鬥中是無敵的，在對特洛伊的史詩戰役中帶領希臘人獲得勝利。不過，他的力量有一個致命的缺點。在嬰兒時期，他母親把他浸入魔法冥河中，使他具有無敵的力量。不幸的是，當她把孩子放入河裡時，她必須提著他的腳後跟，以致留下一個關鍵性弱點。後來，他在特洛伊戰爭中，就因腳後跟中箭而死。

今天，科學家感到疑惑，從實驗室冒出來的新種生物，會不會也有隱藏著的阿基里斯腳後跟？例如，現在大約有三十三種記憶力和表現被增強的「聰明鼠」品種。然而，記憶力雖然增強了，卻有出乎意外的副作用：聰明鼠有時會因恐懼而癱瘓。例如，讓牠接觸極為溫和的電擊，牠們會害怕得發抖。加州大學洛杉磯分校的阿西諾‧席爾瓦（Alcino Silva）也培養出他自己的聰明鼠品種。他說：「看來牠們像是記得太多。」科學家現在認識到，若要了解這個世界的意義，並使擁有的知識有系統，遺忘可能和記憶一樣重要。也許我們應當丟掉許多檔案，才能獲得有條理的知識。

這使人想起一九二○年代的一個案例。在俄羅斯神經學家盧里亞（A.R.Luria）的記錄文件中，有一個具有照相儲存式記憶的男性。他只讀過一遍但丁（Dante Alighieri）的《神曲》（Divine Comedy），就已記得其中每一個字。這對他的記者工作的確很有幫助，但他無法了解比喻性文字。盧里亞觀察到，「他的理解障礙難以克服：每一個表達引發一個意象，而它又會與另一個記憶喚起的另一個意象起衝突。」

事實上，科學家相信，遺忘和記憶必須平衡。如果你忘記太多，你也許

會忘記以前犯錯的痛苦，但你也忘了關鍵事實和技巧。如果你記得太多，你也許可以記得重要的細節，但可能因為記得每一次傷害和挫折而癱瘓。只有兩者平衡才能獲得最佳理解力。

健美運動者一窩蜂地採用各種據說會為他們帶來名聲和榮耀的藥物和治療。紅血球生長激素（hormone erythropoietin,EPO）可以使帶氧的紅血球增加，因而提高耐力。但因它使血液變濃，它被認為與中風和心臟病有關聯。類胰島素生長因子（Insulin-like growth factors,IGF）會有用，是因為它們幫蛋白質使肌肉變大，但它們已被認為與腫瘤的生長相關。

即使法律通過禁止基因增強，它們也很難禁絕。例如，在進化過程中，父母的基因中已經留有永久性連結，要把所有的優點給子女。而實際上，父母一方面要給孩子們安排小提琴、芭蕾舞和運動課程；但另一方面卻也想要為他們做基因增強，以改進他們的記憶力、注意力、運動能力，甚至是他們的面貌。如果父母聽到謠言說，鄰家的孩子已經做過基因增強，為了增加自己孩子的競爭力，他們會面臨很大的壓力，去給自己的孩子相同的好處。

格雷戈里‧本福德（Gregory Benford）曾說：「我們都知道長得好看的人好辦事。哪一個父母會抗拒這個論點：這樣做會讓孩子在美麗的新競爭世界中擁有優勢？」

到了世紀中期，基因增強可能很普遍。事實上，如果我們要探索太陽系，居住在不適於居留的星球，基因增強也可能是無可避免的。

有人說，我們應當使用訂做的基因來使自己更健康、更快樂。另有人說，我們應當允許基因整容。但最大的問題是：要進行到什麼程度。在任何情境下，要控制改善面容和表現的「訂製基因」的散播，似乎越來越困難。我們並不希望人類分裂成不同的基因派系——已增強的和未增強的。但我們的社會必須以民主程序決定推動此一科技多遠。

我個人相信，將會通過法律來規範這個有影響力的技術。基因治療若被用來治療疾病和引導我們邁向豐饒生活時將會被允許，但若純為整容，則會被限制。這意味著將會有黑市交易產生，以規避法律。所以我們很可能必須對極少部分人口做過基因改良的社會做一番適應。

大部分的情況下，這可能不會形成災難。我們已經能以外科整型來改進

容貌，所以應用基因工程來進行可能有其需要。但當有人嘗試從基因著手改變其人格時，危險性可能升高。影響行為的基因可能很多，而它們以複雜的方式互相影響，所以馴服基因的做法，有可能創造出意外的副作用。我們可能需要花好幾十年，才能梳理出這些副作用。

但是，最大的基因增強——延長人類壽命——又如何？

遙遠未來（二○七○—二一○○）

逆轉老化

有史以來，國王和軍閥有能力號令整個王國，但是有一件事，卻永遠超乎他們的控制：老化。因而，尋找永生乃是人類歷史上最古老的追求。

在《聖經》中，上帝因為亞當和夏娃沒有服從祂有關善惡的知識樹的命令，把他們從伊甸園放逐。上帝怕他們用這知識去解開長生的祕密，讓自己也變成神。《聖經‧創世紀》三：二十二說：「看！那人已經與我們相似，能知道善惡。現在恐怕他伸手摘生命樹的果子吃，就永遠活著。」

除了《聖經》，在人類文明中最古老、最偉大的故事之一，就是西元前二十七世紀的《吉爾伽美什史詩》（The Epic of Gilgamesh），它記述美索布達米亞的偉大戰士。當他那位與他終生結伴的忠誠夥伴突然死亡時，吉爾伽美什決定踏上發現長生祕密的旅程。他聽說，一個聰明人和他的妻子獲得神的恩惠得以免死，且因而在大洪水來臨時，成為他們土地上僅存的人類。經過一段英勇的探索任務，吉爾伽美什終於發現了長生不老的祕密，但卻在最後一刻，眼睜睜地看著一隻蛇把它奪走。

由於《吉爾伽美什史詩》是最古老的文學作品之一，歷史學家相信這個長生的追尋，是希臘作家荷馬寫作《奧得賽》（Odyssey）的靈感來源，也是《聖經》裡提及的諾亞洪水的源頭。

許多早期的國王——例如約於公元前兩百多年統一中國的秦始皇——派遣龐大艦隊去尋找長生不老的仙藥，結果失敗了。（依據神話，秦始皇下令，如果艦隊無法找到仙藥，他們就不准回來。由於找不到仙藥，也不敢回去，所以他們發現了日本。）

好幾十年來，多數科學家相信壽命是一定的，而且科學無能為力，永遠無法加以改變。在過去數年，一系列令人震驚的實驗結果已經徹底革新此一領域，這個觀點也被破壞了。老年學原本暮氣沉沉，一灘死水，現在變成了熱門領域，吸引了好幾億美元的研究經費，甚至提高了商業化的可能性。

老化過程的祕密現在正被揭開，而遺傳學將在這過程中扮演不可或缺的角色。看看動物王國，我們發現壽命差異極大。例如，我們的DNA與我們最接近的遺傳親戚黑猩猩的，差異只有百分之一‧五，但我們的壽命多了百分之五十。透過分析少數我們與黑猩猩不同的基因，我們或可斷定，為什麼我們的壽命比我們的遺傳姻親長那麼多。

這一點，反過來又給我們一個「老化整合理論」，把好幾條分支的研究線，結合為單一、連貫的織錦。科學家現在知道老化是什麼。它是在基因和細胞層次上的錯誤累積。這些錯誤，可以用不同的方式組成。例如，新陳代謝製造出自由基和氧化作用，這兩者會傷害我們細胞脆弱的分子機制，使它們老化；錯誤可以像廢物場一般將分子碎片堆積在細胞內外。

這些基因錯誤的堆積乃是熱力學第二定律的副產品：熵（指混亂）的總量始終在增加中。這也就是為什麼生鏽、腐壞、凋謝等等，是普遍存在的生命特色。第二定律無可迴避。任何物體，從地上的花，到我們的身體，甚至宇宙本身，都註定要走向凋謝和死亡。

但在敘述「熵的總數始終在增加」的第二定律中，有一個很小卻重要的漏洞。這意味著你可以事實上減少一個地方的熵，將老化倒轉，而以造成另一個地方的大破壞為代價。這在奧斯卡‧王爾德（Oscar Wilde）著名的小說《格雷的畫像》（The Picture of Dorian Gray）中略為提及。格雷先生總是神祕地永保年輕。但他的祕密是畫出自己老化的醜陋。所以，老化的總量還是繼續增加。熵的原理也可以在電冰箱的背後看到。在冰箱裡面，當溫度降低時，熵降低。但為了降低內部的熵，必需有一個馬達，在冰箱背後增加熱量，也就是增加了機器外面的熵。這就是為什麼電冰箱背後總是熱的。

如同諾貝爾獎得主理查‧費曼曾說過：「目前為止，還沒發現過任何東西顯示死亡之無可避免。這也暗示我，它並非完全無可避免。生物學家

終將發現，到底是什麼為我們帶來困難，而這可怕的普遍性疾病或人類肢體的暫時性，將會被治癒。那只是時間問題。」

第二定律也可以在女性荷爾蒙雌激素的作用中看到——它使女性保持青春活力直到更年期——也就是當老化加速，死亡率升高時。雌激素就像把高辛烷值的汽油放入跑車。車子表現特別好但代價是引擎磨損較多。對婦女而言，這種細胞的損傷可能顯現為乳癌。事實上，我們已知注射雌激素會加速乳癌的生長。所以婦女在更年期前為青春和活力所付出的代價，可能就是熵總量的增加，而在這個案例中，其代價就是乳癌。（有數十個理論被提出，以解釋最近乳癌罹患率的增加——這些理論仍然很有爭議性。有一個理論說，這與月經週期的總數有關。在古代，青春期以後的婦女，在停經以前較常懷孕，停經以後較快死亡。這表示她們有較少行經週期，低度的熵，也因此可能相對較少發生乳癌。今天，年輕女孩較早到達青春期，有較多行經週期，生育平均一‧五個小孩，平均壽命超過停經期，因而被認為暴露於雌激素較多，導致乳癌發生的機率增加。）

最近，已有一系列有關基因和老化惹人注意的線索被發現。第一，研究人員已經證實，有可能培育出好幾代比正常動物還活得久的動物。特別是酵素細胞、線蟲和果蠅，可以在實驗室中繁殖而比正常活得久。當加州大學爾灣分校的麥克‧羅斯（Michael Rose）宣布，他能夠透過選擇性繁殖，增加果蠅的壽命百分之七十時，科學世界感到震驚。他的「超級蒼蠅」或「麥修撒拉蒼蠅」（Methuselah，舊約《聖經》中的高壽人物）被發現還有高品質的抗氧化劑——超氧化物歧化酶（superoxide dismutase,SOD）——可以減緩自由基所造成的傷害。一九九一年，科羅拉多大學的托馬斯‧強森（Thomas Johnson）分離出一個基因，並將之命名為「年齡一號」（age-1）。它似乎可以決定線蟲的老化，並增加它的壽命百分之一百一十。他說：「如果人類有類似『年齡一號』的東西存在，我們就可以做出驚人的事情來。」

科學家現在已經分離出一些在低等生物控制老化過程的基因（age-1、age-2、daf-2），這些基因在人類也有對應物。事實上，有一個科學家論及，改變酵母菌細胞壽命，幾乎就像是輕輕撥動一個電燈開關。當有人啟動某一特定基因，細胞就活久一點。當你關掉它，它們就活短一點。

相對於繁殖人類的艱難任務，繁殖長壽酵母菌顯得相對簡單許多。人類活得久，使得試驗幾乎不可能進行。但在未來，分離與老化相關的基因，將會加速進行，特別是在每個人都持有自己的基因組資料時。到那時候，科學家會有超大量的數十億基因資料庫，可以交由電腦分析。科學家將可以掃描兩個團體（年輕的和年老的）的數百萬個基因組。比較兩組，可以在基因層次找到老化的位置。這些基因的一個初步掃描，已經分辨出大約六十個老化較為集中的基因。

例如，科學家知道長壽往往是家庭遺傳。長壽的人，往往有長壽的父母。這種效果並非突然發生，而是可測量的。科學家分析出生後分開生活的同卵雙生的孿生子，也可在基因層次看到這一點。但我們的預期壽命，並非百分之百由我們的基因決定。做過這方面研究的科學家相信，我們的壽命只有百分之三十五由基因決定。所以，在未來，當每個人都能花一百美元就擁有自己的基因組時，我們將可用電腦掃描數百萬人的基因組，以分辨出部分控制壽命的基因。

此外，這些電腦分析將可精確找出發生老化的位置。在汽車，我們知道老化主要發生在引擎，那裡是汽油氧化燃燒的地方。類似地，基因分析顯示，老化集中在細胞的「引擎」或細胞的發電廠「粒線體」上。這點讓科學家可以縮小研究「老化基因」的範圍，尋找在粒線體內加速基因修補的方法，以逆轉老化作用。

到了二○五○年，有可能透過多樣的治療，如幹細胞、人體器官商店和基因療法修補老化基因等等，來減緩老化過程。我們可能活一百五十歲以上。到了二一○○年，可能透過加速細胞修補機制，逆轉老化作用，活得更久。

卡路里限制

這個理論也能解釋一個奇怪的事實：限制卡路里（即降低卡路里攝取量百分之三十以上）可以增加壽命百分之三十。目前為止，任何生物研究（從酵母菌、蜘蛛、昆蟲到兔子、狗和現在的猴子）都出現這種現象。被餵食這種限制性飲食的動物，有較少的腫瘤和心臟病、糖尿病發生率較低，也較少與老化相關的疾病。事實上，卡路里限制乃是目前所知唯一保證可以延長壽命的機制。這種方法已經一再於整個動物王國中重複

驗證過，而且每一次都有效。目前為止，主要的物種中，只有靈長類（人類是其中之一）還未能進行卡路里限制實驗，因為他們的壽命很長。

科學家特別渴盼看到恆河猴的卡路里限制實驗的結果。終於，二○○九年等待已久的結果出來了。經過二十年的卡路里限制，威斯康辛大學的研究顯示，限制食物的猴子全體都受到較少病痛：較少的糖尿病、癌症、心臟病。總之，這些猴子比被餵食正常食物的親戚們健康。

有一個理論可以解釋這一點：自然賦予動物兩個「選擇」，以決定如何運用他們的能量。當資源充沛時，能量用來繁殖。當飢荒時，身體關閉繁殖作用，保存能量，試圖安全度過飢荒。在動物王國，接近飢餓狀態的情況很平常，因而動物經常做出關閉繁殖的「選擇」，減緩新陳代謝作用，活得久一點，希望有較好的未來。

老化研究的聖杯（難以實現的夢想），就是以某種方式保留限制卡路里的好處，而無負面影響（讓自己挨餓）。人類的自然趨勢，顯然是增加體重，而非降低它。事實上，活在限制卡路里狀態下並無樂趣；你要勉強吞進苦行僧都難以下嚥的東西。而且，動物被餵養特別嚴格限制的飲食以後，變得嗜睡、呆滯，並且對性失去興趣。引起科學家興趣的是尋找控制此一機制的基因，而這會使得我們可以得到限制卡路里的好處而無壞處。

一九九一年被麻省理工學院的研究人員李奧那德·加倫特（Leonard P.Guarente）等人發現了一個重要的線索，他們致力尋找酵母菌中可以延長壽命的基因。加倫特和哈佛大學的大衛·辛克來（David Sinclair）及其他夥伴，發現了SIR2基因。該基因與帶來限制卡路里的效果相關。它的職責就是偵測細胞的能量保存。當能量保存低時（如飢荒期間），這個基因就啟動。這正是你會期望於基因的——控制卡路里限制的效果。他們也發現老鼠和人類也有與SIR2相對應的基因（稱為SIRT基因），該基因可以製造一種SIR2蛋白質（或稱sirtuin）。然後他們開始尋找啟動SIR2蛋白質的化學物質，結果發現了白藜蘆醇（resveratol）。

這點很迷人，因為科學家相信白藜蘆醇可能就是紅酒中的有效成分，也可以解釋「法國矛盾」——法國菜用了很多醬料，很多肥肉和油，但法國人似乎壽命正常。這個神祕或可解釋，因為法國人喝很多紅酒，其中

含有白藜蘆醇。

科學家已經發現SIR_2蛋白的啟動者可以保護老鼠，免患許多種重要疾病，包括肺癌、結腸癌、黑色素瘤、淋巴瘤、第二型糖尿病、心臟病以及老年失智（依據辛克來的研究）。對人類而言，這些疾病即使只有一小部分能透過SIR_2來治療，也將對整個醫療產生革命性影響。

最近，有一個理論已經被提出來，解釋白藜蘆醇不尋常的全部特性。依據辛克來的說法，SIR_2的主要作用是避免某些基因被啟動。比如，單一細胞的染色體，如果完全攤開，將會有六英尺長，構成一個特別長的分子。任何時間，這個六英尺長的染色體只有一部分的基因派上用場，其他全部未啟動。細胞在不需要時將多數基因用染色質將染色體緊緊裹住，不讓它們活動。而染色質就是由SIR_2維持。

不過，有時候，這些脆弱的染色體也會遭遇災難性的干擾，如雙螺旋中的一條完全斷裂。這時SIR_2立刻採取行動，幫忙修補破壞的染色體。但SIR_2暫時離開崗位去救援時，它們必須放棄原本負責使基因安靜的主要任務。因此，基因被啟動，造成基因的大混亂。辛克來認為，這個故障，就是老化的主要機制之一。

如果這是真的，那麼SIR_2不但可以中止老化，還有可能逆轉它。我們的細胞DNA的傷害很難修補和回復。但辛克來相信，我們的老化很多都是因為SIR_2不務正業，容許細胞退化的結果。他說，這些SIR_2移轉工作的問題很容易加以逆轉。

青春之泉？

這個發現的一個不必要的副產品，就是由它引發的熱鬧新聞。突然間，電視節目《六十分鐘》（60 Minutes）和《歐普拉秀》（The Oprah Winfrey Show）以專題報導了白藜蘆醇，造成網路上的一窩蜂。一夜之間，隔夜送達的公司林立，爭相承諾提供不老仙丹。彷彿每一個賣蛇油的推銷員和江湖醫生都要跳上白藜蘆醇的馬蓬車。

（我曾有機會在加倫特的實驗室，訪問到啟動這一波新聞浪潮的加倫特

本人。他發言審慎，也知道他的研究結果可能帶來的影響，以及可能引發的誤解。他特別憤怒的是，許多網站現在廣告說，白藜蘆醇有點像是青春之泉。他說，那是很糟糕的事，在白藜蘆醇暴得大名後，人們都想花錢去買，雖然多數的結果都是暫時性的。不過，他也不願意排除某一天有此可能：也許青春之泉的確存在，也被找到，那麼SIR_2也許會扮演部分角色。事實上，他的同事辛克來承認，他每天都服用大量的白藜蘆醇。）

科學社群中對老化研究的興趣非常高昂，因此哈佛大學醫學院於二○○九年舉辦一個會議，吸引了此一領域的一些重要研究人員。聽眾中有許多人正在接受限制卡路里的飲食。他們將自己的科學信念付諸實施，實際限制自己的飲食，看來憔悴而虛弱。其中也有「一二○俱樂部」成員（他們打算活到一百二十歲）。大家的興趣，特別集中在辛克來和克里斯多福‧韋斯特法爾（Christoph Westphal）共同創立的Sirtris藥物公司，該公司的一些白藜蘆醇替代物已經進入臨床試驗階段。韋斯特法爾坦白地說：「在五或六、七年內，將會有延長壽命的藥物出現。」

當他們進行試驗時，對於某些少數幾年前根本不存在的化學物質，特別感到興趣。SRT_{501}被用來測試對抗多發性骨髓癌和結腸癌。SRT_{2104}被測試來對抗第二型糖尿病。除了SIR_2之外，還有許多其他基因、蛋白質和化學物質，其中包括IGF_{-1}、TOR和雷帕黴素（rapamycin），都正在被不同的團隊用心分析著。

只有時間才能告訴我們，這些臨床試驗能否成功。有關老化過程，醫學史上布滿許多作假、詐騙和詭計。但科學（而非迷信）是基於可以再現、可測驗和可證明真假的資料。國家衛生研究院已設立許多研究計畫，去測試各種物質對老化的影響。我們將可以看到這些引人注意的動物研究能否應用到人類身上。

我們一定會死嗎？

生物科技先鋒威廉‧哈索汀（William Haseltine）曾告訴我：「生命的本性是不朽的，它永遠長存。DNA是一種永生的分子。那分子大約於三十五億年前出現，完全相同的分子透過複製，現在仍然存在……我們的確會衰老，但是我們已經在談論並計畫於未來改變它的能力。首先，延長

生命兩倍或三倍。然後也許（如果對大腦有足夠的了解）就能無限延續身體和大腦。我不以為那是違反自然的過程。」

進化生物學家指出，當動物在生育期間，他們就會有進化的壓力。當動物過了生殖年齡，它事實上變成了這個團體的負擔，因而進化設定它因年老而死亡。所以，我們可能已被設定會死亡。但也許我們可以重新設定自己的程式，活久一點。

事實上，如果我們觀察哺乳動物，會發現體型越大的哺乳類動物，代謝效率越低，也活得越久。以老鼠為例，它們體重不重，卻燃燒掉大量的食物，而只活了大約四歲。大象的代謝率遠遠較低，卻活到七十歲。如果代謝與錯誤的累積對應，那麼這顯然表示，如果你的代謝率越低，就活得越久。（這可以解釋「蠟燭兩頭燒」的含意。我曾讀過一篇短篇小說，有關一個精靈答應實現一個男人的願望。他立刻要求活一千年。精靈實現了他的願望，但把他變成了一棵樹。）

進化生物學家嘗試以「長壽如何幫物種在荒野中存活下去」來解釋壽命。對他們而言，物種的壽命是由遺傳決定，因為它幫物種存活和繁衍。在他們的觀念中，老鼠的生命如此短暫，是因為它們不斷地被多樣的掠奪者獵殺，也常在冬天被凍死。能夠把基因遺傳給下一代的老鼠，就是那些有最多子孫而非活得最久的老鼠。（如果這個理論正確，那我們可以預期，能夠從掠奪者飛逃離開的老鼠，也會活得比較久。事實上，與老鼠同樣大小的蝙蝠，壽命就是老鼠的三‧五倍。）

但爬蟲類有一個異常現象。某些爬蟲類顯然壽命多長無人知。牠們可能永遠活著。就像短吻鱷（Alligator）和一般鱷魚（crocodile）只是越長越大，但依舊活力充沛。（教科書上聲稱，短吻鱷只活七十歲。但這可能是因為動物園管理員只活七十歲。其他教科書比較誠實，只是說這些動物的壽命超過七十歲，但不曾在實驗室的情境下仔細測試過。）在真實情境中，這些動物並非不會死，因為它們也會因意外、飢餓、疾病等而死。但如果放在動物園，它們有很長的壽命，彷彿會永遠活下去。

生物時鐘

另一個耐人尋味的線索來自細胞的端粒（telomere），其角色有點像「生物時鐘」。如同鞋帶的塑膠末端，端粒就在染色體的末端。每一次

生殖週期之後，它們就會比上一次短一些。最終，經過大約六十次左右的生殖（就皮膚細胞而言），端粒就會被拆散。然後細胞進入衰老，停止正常的表現。所以，端粒就像一根火藥的引信。如果引信在每次繁殖週期之後都變短，最後引信就會消失，而細胞也就停止繁殖。

這就是所謂「海弗利克限制」（Hayflick limit）。它似乎定了某些細胞生命週期的上限。例如，癌症細胞沒有「海弗利克限制」，而製造一種被稱為「端粒酶」（telomerase）的酵素，可以避免端粒變得越來越短。

端粒酶可以合成。當我們應用於皮膚細胞，它們顯然可以無限複製，變成永生。

不過，這其中也有危險。癌細胞也是生生不息，在腫瘤中不斷分裂。事實上，那就是為什麼癌症如此地致命，因為它們無限複製，直到細胞無法繼續發揮作用。所以端粒酶必須加以小心分析。任何使用端粒來幫生物時鐘重轉的治療必須經過檢查，確定它不會致癌。

永生又青春

延長人類壽命的前景，對某些人而言是愉悅的來源，對另外一些人而言卻很恐怖——當我們考慮到人口爆炸和會帶來國家破產的衰老社會時。

生物的、機械的和奈米科技的治療所產生的綜合效果，不僅會延長我們的壽命，也會使我們常保青春。將奈米科技應用於醫學的羅勃特‧佛雷塔斯（Robert A.Freitas）說：「數十年後，這種干預將會很普遍。實施年度檢查和清除，以及偶爾的大修補，你的生物年齡可以每年修復，回到接近你自己設定的固定生理年齡。你也有可能因意外死亡，但你至少可以活得比現在長十倍。」

在未來，延長壽命將不會是喝下青春之泉這類無稽之談。它比較可能是好幾種方法的結合：

一、在器官衰老或生病時，透過組織工程或幹細胞，培育新的器官。

二、攝取綜合蛋白質和酵素——它們是被設計來增進細胞修補機制、管

理代謝、重設生物時鐘以及減少氧化。

三、用基因療法修改能夠減緩老化的基因。

四、維持健康的生活方式（運動和良好飲的食法）。

五、在癌症等疾病成為問題以前，使用奈米感應器把它們偵測出來。

人口、食物和污染

但這裡有一個令人不安的問題：如果壽命能夠增加，我們必須忍受人口過剩的痛苦嗎？無人知道。

延遲老化過程帶來許多可能的社會效應。如果我們活得久一些，我們不會使地球過度擁擠嗎？但有人指出，延長壽命的主要部分已經發生——在一個世紀內，由四十五歲提高至七、八十歲。它並未創造人口爆炸，結果可以說是相反。當人們活得較久時，他們會因追求生涯發展而延擱生育。事實上，歐洲人口正急劇下降。所以，如果人們活得長久而又富有，他們會把生育子女的間距拉開，生得較少。有了多出來的數十年，人們會重新設定他們的時間框架，因而拉開間距或延擱生育。

還有人聲稱，人們會排斥科技，因為它違反自然，也與宗教信仰衝突。事實上，針對一般大眾的非正式調查顯示，多數人認為死亡是很自然的事，它也賦予生命意義。（不過，多數接受這些調查的人，是年輕人和中年人。如果你去照護中心——在那兒的人們日漸消瘦、痛苦持續相隨，並等待死亡——並詢問相同問題，你可能得到全然不同的答案。）

如同加州大學洛杉磯分校的史托克所說，「漸漸地，我們會為扮演上帝而感到苦惱，而我們對延長生命的憂慮將或許為我們帶來一首新的流行歌曲：『何時給我一顆藥丸？』」

二○○二年，科學家依據最佳人口統計資料估計，有史以來最早的人口統計顯示，當時的人口約為現在人口的百分之六。這是因為人類歷史上大部分時間，人口徘徊在一百萬左右。人們忙著搜尋貧乏的食物，使人口維持在低的數量。即使在羅馬帝國的高峰，人口估計也僅五千五百萬。

但在過去三百年，世界人口的激增，與現代醫藥的興起和工業革命的時間相吻合，後者生產了大量食物和其他供給。在二十世紀，世界人口飆至新高，從一九五○年到一九九二年就已倍增：由二十五億增至五十五億。現在是六十七億。每年增加七千九百萬人，比法國總人口還要多。

如此一來，曾經出現過好幾次世界末日的預言，但目前為止，人類還能閃躲這顆子彈。早在一七八九年，湯馬斯▪馬爾薩斯（Thomas Malthus）就已警告我們，當人口超過食物的供給時，會有何結果。飢荒、食物暴動、政府崩潰以及飢餓的群眾必然會發生，直到人口與資源有了新的平衡。由於食物的供給只會有線性的增加，而人口卻會以幾何指數成長，所以在某一個時間點，世界將面臨突破點。馬爾薩斯預測十九世紀中期將有大飢荒。

但是，在十九世紀，世界人口還在主要增長的早期，由於發現新的陸地、殖民地的建立、食物供給的增加等等，馬爾薩斯所預言的災難並未發生。

到了一九六○年，另一個馬爾薩斯主義者又有了新的預測，認為人口炸彈很快就會攻擊地球，全球性的崩潰將於二○○○年發生。這個預測錯了。綠色革命成功地拓展了食物供給。資料顯示，食物的供給超過了世界人口的增長，因而暫時打敗了馬爾薩斯的邏輯。從一九五○年到一九八四年，穀物生產增加百分之二百五十，主要是由於新的肥料與新的農業科技。

我們又再度躲開了子彈。但現在人口增長如火如荼，而且又有人說，我們已經到了地球創造食物供給能力的臨界點。

不祥的是，食物的供給，包括世界穀物生產和海洋的食物收穫，已經開始進入高原期。英國政府的科學主管警告，在二○三○年會有一個由人口爆炸、食物和能源供應減少構成的完美風暴。聯合國世界糧食暨農業組織說，全世界必須在二○五○年以前增產百分之七十的食物，來養活額外的二十三億人口，否則將面臨災難。

這些預測可能低估了問題的嚴重性。由於數以億計的中國人和印度人加入中產階級，他們將會追求在好萊塢電影中所看到的同等奢華——例如兩部汽車、寬闊的郊區房子、漢堡與炸薯條等等——也會使世界資源更加吃緊。事實上，身為環保領袖、同時也是華盛頓世界觀察研究所創辦

人的萊斯特‧布朗（Lester Brown）就曾對我透露，我們的世界可能無法應付好幾億人對中產階級生活的需求。

世界人口的一些希望

無論如何，還是有一些微弱的希望。控制生育，曾經是一個禁忌，但目前已在已開發國家立足，也正向開發中國家進軍。

在歐洲和日本，我們看到人口向內爆炸，而非向外爆炸。在一些歐洲國家，每個家庭的出生率只有一‧二到一‧四個兒童，遠低於二‧一的替補水準。日本面臨三大詛咒的打擊。一是世界最快老化的人口。例如，日本婦女已經連續二十年保持最長壽的紀錄。二是日本有快速下降的出生率。三是政府維持特別低量的移民。這三種人口力量創造出了低速的火車失事。而歐洲也離它不遠。

這裡我們有一個教訓：世界最大的避孕劑就是繁榮。過去，農夫並無退休計畫或社會安全保障，嘗試儘量多生孩子，來增添幫手並且照顧他們的老年。他們的算盤這樣打：家中每一個小孩表示有更多工作人手，更多收入，和有更多人在老年照顧你。但是當一個農夫進入中產階級，積滿退休福利點數，有了舒適的生活方式時，計算方法改變了：每一個孩子都會降低收入和生活素質。

在第三世界，我們有相反的問題——快速增長的人口。在那裡，很多人口低於二十歲。即使是在預期人口爆炸最高的地區（亞洲和撒哈拉沙漠以南的非洲地區），出生率已經開始下降，理由如下。

第一，當農夫離開祖先留下的土地到大城市碰運氣時，農業人口快速都市化。在一八○○年，只有百分之三的人口住在都市。到了二十世紀末，那個數字增至百分之四十七，預期在未來數十年還會更高。都市中養育孩子的花費急劇降低家庭兒童數。租金、食物和其他花費都如此之高，在大都市貧民窟的工人做了相同的計算，獲得相同結論：多生孩子，降低財富。

第二，當國家正在工業化時（如中國和印度），會創造出中產階級。跟已經工業化的西方人一樣，他們也要少一點的孩子。

第三，婦女的教育創造出一個只要較少孩子的婦女階級，即使在像孟加拉那樣的貧窮國家也是如此。由於教育年限延長，孟加拉即使沒有大規模的都市化和工業化，出生率已經從七降到二‧七。

考慮到所有這些因素，聯合國已經連續好幾次修正未來人口成長的數字。估計仍然不確定，但世界人口在二○四○年可能達到九十億。雖然人口會繼續增長，成長率終將減緩，進而保持水平。樂觀地說，在二一○○年人口甚至可能穩定在一百一十億。

正常的情況下，我們可能會認為，這個人口數超過地球的負荷能力。但那取決於我們如何界定負荷能力，因為也許有另一個綠色革命正在醞釀中。

對其中的某些問題而言，一個可能的解決方法就是生物科技。在歐洲，生物工程食物獲得可能要持續整個世代的罵名。生物科技工業同時對農人推出除草劑和抗除草劑的作物。對生物科技工業而言，這表示更多的銷售；但對消費者而言，這意味著較多毒素在食物中，因而市場快速縮小。

不過，未來的穀物——例如「超級稻米」，也就是特別改良以便在乾旱不毛的惡劣環境中生長的作物，將可能進入市場。而其道德的立足點是：很難反對引進安全而又可以餵飽千千萬萬人的作物。

復育消失的生命形式

但還有別的科學家，不僅僅對延長人類壽命和欺騙死亡有興趣，他們甚至對從死亡帶回生物發生了興趣。

在電影《侏羅紀公園》（Jurassic Park）中，科學家由恐龍化石抽取DNA，注入爬蟲類卵中，使恐龍又有了生命。雖然目前為止未曾在恐龍身上找到可用的DNA，這裡卻有誘人的暗示：這個夢想並非完全無稽。到本世紀末，我們將會發現，動物園內充斥著好幾千年前即已停止在地表行走的生物。

如同早先提及的，藍札是第一個為複製爪哇野牛（一種很危險的品種）開啟了重要步驟的人。他覺得，讓這種稀有野牛品種消失是很可恥的。

所以他正在考慮另一種可能：創造另一種複製動物，但性別相反。在哺乳類動物，性別由X和Y染色體決定。只要對這些染色體做一些小修補，他有信心可以從這個屍體複製出另一隻動物——除了性別相反。如此，世界上的動物園將可享受到觀賞由死亡很久的物種複製而來的小嬰兒。

我曾與牛津大學的理查˙道金斯（Riahard Dawkins）共進晚餐，他也是《自私的基因》（The Selfish Gene）的作者。他又進了一步設想，有朝一日，我們將能讓各式各樣的生命形式復活——不僅僅是有危險性的，還有已經消失很久的。他首先指出，每二十七個月，完成基因排序的數量就會倍增。他計算出來，在未來數十年內，任何人的完整基因組排序只需一百六十美元。他預見有一天，生物學家攜帶著簡便器具，就可以在數分鐘之內，為他們遇見的任何生物做完整的基因組排序。

他又進一步提出理論說，到了二○五○年，我們將能夠只用某一生物的基因組，就創造出完整的生物。他的文章提到，「我相信到了二○五○年，我們將能閱讀生命的語言。只要把未知的動物的基因組輸入，電腦將不僅會建構動物的體態，也能列出牠的祖先的生活世界，包括獵食牠們的動物或牠們捕食的對象，寄生或寄主，築巢位置，甚至希望與恐懼。」道金斯相信，我們可以重建人類基因組與類人猿（ape）之間的「消失的連結」（missing-link），這句話他是從西德尼˙布倫納（Sydney Brenner）的作品中引用來的。

這將是真正的重大突破。依據化石和DNA證據，我們在大約六百萬年前與類人猿分手。

由於我們的DNA與黑猩猩相差只有百分之一˙五，未來的電腦程式將能分析我們的DNA和黑猩猩的DNA，然後以數學方法計算生出這兩個物種共同祖先的近似DNA。一旦這個共同祖先的假設性的基因組經由數學重建出來，電腦程式就可以為我們的祖先進行視覺重建（外觀），也讓我們知道牠的性格。他將這個計畫命名為「露西基因組計畫」（Lucy Genome Project），以紀念一個著名的南方古猿（Australopithecus）的化石。

他甚至提出理論說，一旦「消失的連結」的基因組由電腦程式重建完成，就有可能實際創造出這個有機體的DNA，把它植入人卵，然後將卵

置入女性身體，她將會生出我們的原種。

雖然這種設想在少數幾年前，會被認為是荒謬可笑的而被放棄，但現在有一些新的發展顯示，它並非完全荒誕的夢想。

首先，我們與黑猩猩有差異的少數關鍵性基因，現在正在進行詳細分析。一個有趣的候選者是ASPM基因，它負責控制大腦的尺寸。人類的大腦尺寸在數百萬年前因為現在尚未知悉的理由而增加。當這個基因變異，它造成畸形小頭，頭顱較小而大腦減少百分之七十，約等於數百萬年前我們的先民的尺寸。分析顯示，在過去五、六百萬年間，從我們與黑猩猩分開時起，發生過十五次變異，而那個起點剛好與我們的大腦尺寸增加的時間吻合。相對於我們的許多靈長類親戚而言，人類經歷了這個關鍵性基因最快速的改變。

更有趣的是基因組中的第一號人類加速區（HAR1），這個區內包含一百一十八個字母。在二○○四年發現，在這個區內人類與黑猩猩的關鍵性差異，只有十八個字母。黑猩猩和雞在三億年前岔開，但是牠們在HAR1區內的鹼基對的差異，只有兩個字母。這意味著HAR1區在整個進化歷史上極為穩定，直到人類出現後才開始改變。所以使我們變成人類的基因，也許就在那裡面。

但是，還有一個更精彩的發展，使得道金斯的提議看來更合理。我們的基因最接近的鄰居、消失很久的尼安德塔人的完整基因組，已經完成排序。也許透過人類、黑猩猩及尼安德塔人的基因組電腦分析，我們就能用純粹的數學計算，重建出「消失的連結」的基因組。

重現尼安德塔人？

人類和尼安德塔人可能是在三十萬年前岔開。但這些原始人三萬年前就消失於歐洲。所以長久以來，人們認為，要從死亡多年的尼安德塔人抽取可用的DNA，根本是不可能的事。

但是二○○九年，來比錫的馬克斯普朗克進化人類研究所宣布，由斯萬·帕博（Svante Pääbo）所領導的團隊，在分析過六個尼安德塔人的DNA以後，已經製作出完整尼安德塔人基因組的第一個草稿。這是一個劃時代的成就。如同預期，尼安德塔人基因組與人類基因組極其相似。兩者

都包含三十億個鹼基對，但在一些關鍵點也有所不同。

史丹佛大學人類學家理查‧克萊因（Richard Klein），談論到帕博團隊的成果時說，此一重新建構，將可回答一些存在已久、有關尼安德塔人的行為問題，如他們是否能說話。人類的$FOXP_2$基因有兩個特別的改變，是我們能說數千字的部分原因。一個嚴密的分析顯示，尼安德塔人的$FOXP_2$基因，也有相同的兩個基因改變。所以，可以相信尼安德塔人也能像我們一樣發聲。

因為尼安德塔人是基因上與我們最接近的親戚，他們當然會引起科學家高度興趣。有些人提出，有一天可以重建尼安德塔人的DNA，將它放進一個卵中，這個卵有機會變成活生生的尼安德塔人。於是，在消失數萬之後，尼安德塔人又重新在陸地上行走。

哈佛大學醫學院的喬治‧丘奇（George Church）甚至估計出，使尼安德塔人活過來約需花費三千萬美元，他也擬出了實踐計畫。我們可以把人類整個基因組分切，每片含有一萬對基因，將每一片放入細菌中，把基因組修改成與尼安德塔人的基因相符，然後再把所有經過修改的片段接合起來，成為完整的尼安德塔人的DNA。這個細胞將會被重新改編，回復到胚胎時期，然後置入雌性黑猩猩子宮中。

不過，當史丹佛的克萊因提到「我們要把他們放在哈佛大學，還是在動物園中」的時候，也引起一些合理的關注。

道金斯警告說，所有這些有關重建另一個像是尼安德塔人這種消失已久的物種，「無疑地，將會喚起倫理的憂心」。尼安德塔人能享有人類的權利嗎？如果他或她想結婚，會發生什麼事？如果他或她被傷害或傷害別人，誰來負責？

所以，如果尼安德塔人可以恢復生命，科學家能夠像創造猛獁象（mammoth）一樣，也為消失已久的動物創造一個動物園嗎？

讓猛獁象重現？

這個想法乍聽之下好像很瘋狂，其實不然。科學家已經能夠為消失已久的西伯利亞猛獁象的許多基因組做出排序。以前，只有很小片段的DNA

被從多毛的猛獁象抽取出來。這些猛獁象數萬年前被冰凍在西伯利亞。賓州大學的韋伯‧米勒（Webb Miller）和史蒂芬‧舒斯特（Stephan C.Schuster）完成了不可能任務：他們從許多冰凍的猛獁象屍體中萃取出了DNA的三十億個鹼基對。而在此之前，為消失的物種的基因做排序的記錄只有一千三百萬個鹼基對——少於動物基因組的百分之一。（這是由於一種被稱為「高功能排序處理裝置」的新排序機器，一次可以掃描數千個基因，而非每次一個——使突破成為可能。）另一個竅門是知道從哪裡去取古代的DNA。米勒和舒斯特發現在猛獁象的毛囊中而非身體裡，含有最佳的DNA。

重建消失的動物的構想，現在從生物學來看已經是可能的事。舒斯特說：「一年前，我會說，這是科幻小說。」但現在，有了這麼多的猛獁象基因組排序，這已不再是狀況外的問題了。他甚至也草擬了執行方法。他估計，只要在亞洲象的DNA中，做四十萬個改變，就能創造出一隻擁有猛獁象全部主要特性的動物。我們有可能在大象的DNA進行基因改變，達到這些設定的改變，把改造過的DNA置入象卵核中，然後將卵移植到雌象中。

這個團隊已經規劃為另一種已經消失的動物進行排序，那就是袋狼（thylacine）。牠是一種澳洲有袋動物，與卡通人物塔斯馬尼亞惡魔（Tasmanian deveil）關係密切，消失於一九三六年。也有一些人談到渡渡鳥（dodo，與鴿類有親緣關係的一種不能飛的大鳥）的排序。「像一隻死渡渡鳥」（Dead as a dodo）已是常用成語，意指徹底的消失、無法挽回，但如果科學家能夠由渡渡鳥屍體的軟組織和骨骼抽取有用的DNA，那麼這句成語就要被淘汰了。

侏羅紀公園？

很自然地，又要回到原來的問題：我們能使恐龍復活嗎？一句話：可能不行。一個侏羅紀公園能否成真，取決於能否從六千五百萬年前已經死光的屍骨中取回有生命形式而又完整無缺的DNA，而這一點也許不可能。雖然曾在恐龍化石緊密的骨骼中發現軟組織，但是到目前為止，還沒有DNA能透過這個方式取出，有的只是蛋白質。雖然這些蛋白質已經用化學方法證明暴龍與青蛙及雞之間密切相關，但距離能夠召喚恐龍回來還很遙遠。

不過，道金斯認為有其可能性——如果能就多樣的鳥類和爬蟲類的基因組做基因比較，然後精確地重建一隻「共通恐龍」（generalized dinosaur）的基因排序。他指出，引導雞的喙狀嘴長出牙齒的芽點（bud），和引導蛇生出腳來，是有可能的。因此，已經埋沒於時光之沙中的古代特徵，有可能還在基因組中徘徊。

這是因為生物學家現在認識到，基因可以啟動，因而也可以關閉。這意味著古代特徵的基因，可能仍然存在，它們只不過是在休眠中。只要打開這些休眠中的基因，有可能把這些古代的特質找回來。

例如，古代雞爪曾經有蹼。這種蹼的基因並未消失，只是被關閉。只要把這個基因再打開，我們原則上就能創造出有蹼的雞了。同樣地，人類曾經覆蓋著毛皮，當我們開始流汗（那是很有效的調節體溫方式）以後，我們失去了毛皮。（狗沒有汗腺，只好用喘氣冷卻自己。）人類的皮毛基因顯然還存在，但已被關閉。因此，只要打開這個基因，將會有人身上有毛皮。（有人推測，這也許就是狼人存在的理由。）

如果我們假定，恐龍的某些基因，雖然事實上已被關閉好幾百萬年，但仍殘存於鳥類基因組中，那麼就有可能再啟動這些休眠已久的基因，從鳥類引導出恐龍的特徵。所以，道金斯的提議雖是猜測，並非完全是無稽之談。

創造新的生命形式

這又帶來了最後的問題：我們能按照自己的意願創造生命嗎？人類是否不但能創造消失多年的動物，而且也能創造出不曾存在的動物？例如，我們能否創造出有翅膀的豬，或古代神話中描述的動物？即使到了世紀之末，科學仍然無法接受訂製動物。無論如何，在有能力修改動物王國以前，科學還有漫長的路要走。

目前，限制因素在於我們移動基因的能力。只有單一的基因可以有效地修正。例如，要在特定的動物發現使它在夜間發光的基因是可能的。這個基因可以被分離，然後放入另一種動物使它也在夜間發光。事實上，在家庭寵物添加單一基因的研究已經在進行中。

但創立全新的動物，例如希臘神話中由三種不同動物組合的吐火獸

（chimera），需要移轉數千個基因。創造有翅膀的豬，必須移動好幾百個代表翅膀的基因，並確定肌肉和血管都接得天衣無縫。這離現在能辦到的太遙遠了。

不過，已有一些進展可能促進未來的可能性。生物學家很驚奇地發現，基因描述人體的布局（從頭到腳）完全依序反映在染色體上。這些被稱為「同源盒結構基因」（the HOX genes），用來描述身體如何構成。大自然顯然是走了捷徑，按照身體器官的次序排列染色體。這一點又大大地加快了這些基因演化歷史的解密速度。

再進一步，有些主要基因顯然管理著許多其他基因。透過操縱這些基因，我們可以操縱好幾十種基因的性質。

回顧過去，我們看見大自然已經決定，採用與建築師創立藍圖非常類似的方式，創造人體的設計圖。基因組的設計藍圖的次序與真實建築物的藍圖完全一樣。另外，藍圖是模組化的，所以單一藍圖中又含有分塊的次級藍圖。

除了以基因模組創造出全新的混種動物，還可能將遺傳學應用到人類。藍札相信，只要完整無缺的細胞可以從死亡已久的人體抽取，就有可能把這個人的生命帶回來。在西敏寺，我們小心地保存著亡故已久的國王和皇后，以及詩人、宗教人物、政治家，甚至科學家牛頓等人。藍札透露說，或許會有一天，人類能從這些遺體中找到完整的DNA，並且讓他們復活。

在電影《巴西來的男孩》（The Boy from Brazil），情節環繞著希特勒的復活開展。但你千萬別相信，可以將任何這些歷史人物的天才或惡行召喚回來。如同一個生物學家曾經提及的，如果你使希特勒復生，得到的也許是一個二流的藝術家（那是領導納粹運動之前的希特勒）。

禁止所有的疾病？

預言電影《未來世界》（Things to Come）是由威爾斯（H.G.Wells）的小說改編。它預言文明的未來，其中第二次世界大戰釋放出無止境的痛苦和不幸的循環。最後，所有的人類的成就都變成斷垣殘壁，留下軍閥幫派統治著虛弱而又受壓制的人民。但在電影結束時，一群有遠見的科

學家，以強力的超級武器武裝起來，開始恢復秩序。文明終於從廢墟中重新興起。其中一個場景，一個孩子被教導二十世紀的殘酷歷史，並學習某種被稱為「感冒」的東西。什麼是感冒？女孩問。有人教她，感冒是某種很久以前被消滅的東西。

也許並非如此。

消滅所有的疾病是我們最古老的目標之一。但即使到了二一○○年，科學家將無法消滅所有的疾病，因為疾病的變異比我們的醫療進展還要快，而且它們種類繁多。我們有時會忘記，我們居住在細菌與病毒的汪洋中，它們在人類降生好幾十億年前即已存在，而且會在人類消失以後繼續存在數十億年。

許多疾病的來源是動物。人類從大約一萬年前開始馴養動物，疾病就是代價之一。所以在動物之中還有一個很大的疾病倉庫潛藏著，它們也會存活得比人類久遠。正常時，它們只感染少數人。但隨著大城市的興起，這些會傳播的疾病，可以在人群中迅速擴散，達到關鍵性的數量，創造了流行病。

例如，當科學家分析流感病毒的基因排序時，他們很驚訝地發現它的來源：鳥類。許多鳥類可以帶有多樣流感病毒而自身不受影響。但豬在吃進鳥類糞便以後，有時會成為基因的攪拌碗。而農人往往住在兩者附近。有人猜測，這就是為什麼流感病毒往往來自亞洲，因為那裡的農夫同時飼養多種動物，例如同時生活在鵝與豬的附近。

不久前的H_1N_1流行性感冒，只是最近的一波鳥流感與豬流感的變異。

問題之一是，人類不斷地向新的環境擴充，砍倒森林、建造郊區和工廠，因而在擴充過程，遭遇潛藏於動物的古老疾病。由於人口持續擴張，我們可以預期得到，會發現更多意外從森林中跑出來。

例如，相當多的證據顯示，愛滋病病毒開始時是類人猿（simian）的免疫缺損病毒（SIV），原來只感染猴子，然後才跳到人身。同樣情形，當西南部的人們侵入草原齧齒動物的領土時，也感染了漢他病毒（hantavirus）。萊姆病（Lyme disease）主要是由於蜱類的傳染。它會侵入美國東北地區的城市郊區，是因為人們在蜱類居住的森林附近蓋房子。伊波拉病毒（Ebola virus）可能在古代就已感染某些部族。但它只

有在噴射機旅行來臨後，才傳給較多的人，並且上了頭條新聞。即使是退伍軍人症（Legionnaires）也可能很古老，它原來是在停滯的水中繁殖，但由於空調機激增，在遊輪上把這個疾病傳給年長者。

這表示，隨著新的怪病占據報紙大標題，未來還會有很多意外出現。

不幸的是，治療方法可能會慢半拍。

例如，連普通感冒現在也沒解藥。藥房裡發現的一大堆產品，只能治療它的症狀，而不是殺死病毒本身。問題是，可能有超過三百種鼻病毒（rhinovirus）的變種會導致感冒。為所有的三百種病毒製造疫苗顯然太昂貴。

人類免疫缺陷病毒（HIV，俗稱愛滋病毒）的情況更糟，因為它也許有好幾千種變異。事實上，愛滋病毒變異之快，遠非疫苗發展所能趕上，即使為一個變種發展出一種疫苗，這病毒也會迅速變異。為愛滋病毒設計疫苗，如同射擊飛靶。

所以未來我們能夠治療很多疾病的同時，還是可能會有一些疾病躲過最先進的科學。

美麗新世界

到了二一○○年，在即將控制人類的遺傳命運時，我們必須將人類的命運，與赫胥黎（Aldous Huxley）在預言小說《美麗新世界》（Brave New World）中所描繪出來的反面烏托邦做比較，他設定的時間是二五四○年。這本書於一九三二年出版時，全世界為之震驚、沮喪。

然而過了七十五年以後，他的許多預言已經過時。當他寫到試管嬰兒、性的歡愉和生殖分道揚鑣、以及吸毒變得普遍時，他醜化了英國社會。但現在我們居住在一個認為試管授精和避孕是理所當然的世界。（唯一還沒過時的主要預言是人類的複製。）他預見一個階級世界，其中醫生精心地複製腦傷的胚胎，讓他們長大成為統治菁英的僕人。依據心智受傷的程度，他們被分級歸類，甲級（Alphas）恰到好處最好用，戊級（Epsilons）是心智有點過低的奴隸。所以，科技並非用來將人類從貧窮、無知和疾病解放，而是一個夢魘，以奴隸全部人民為代價，去強化

人為的和腐敗的穩定。

雖然這本小說在很多方面都正確，赫胥黎並未預想到會有基因工程。如果他知到了這個科技，他可能還要擔憂另一個問題：我們的子孫的基因，在難以捉摸的父母，加上不光明正大的政府的干預下，會造成人種的分化破碎嗎？父母已經為他們的孩子穿上奇裝異服，讓他們參與不正經的比賽，所以，為何不改變基因以迎合父母的奇想？事實上，父母可能已經被進化建立根深蒂固的連結，要留給下一代所有的好處。所以為什麼不乾脆連基因一起馴服？

在可能發生的錯誤中，超音波掃描是一個初淺的例子。雖然醫生無辜地運用超音波來幫忙孕婦，這已經導致雌性胎兒的大量人工流產，特別是在中國和印度鄉下。在孟買的一項研究發現，在八千個墮胎胎兒中，有七千九百九十七個是女的。在南韓，排行老三的孩子，有百分之六十五是男生。由父母依據性別來決定是否墮胎之後出生的世代，很快地來到適婚年齡，將會有好幾百萬人找不到配偶。這一點又會導致社會紊亂。只要男孩傳宗接代的農夫，會發現他們沒有孫子。

而在美國，人體生長荷爾蒙（HGH）的誤用到處蔓延。它常被誇大為對付老化的妙藥。最初，它是用來矯正長不高的小孩的荷爾蒙不足。現在HGH反而基於有問題的有關老化資料，而發展為巨大的地下工業。事實上，網路已經創造了一大批人，像供作實驗的幾內亞豬一般，成為虛有其表的治療的實驗品。

所以，人們只要有機會，往往誤用科技並造成大量的損害。如果他們找到基因工程，會發生什麼？

在最壞的狀況，我們會實現威爾斯在他的古典中篇科幻小說《時光機器》（The Time Machine）中的夢魘。那是西元八十萬二千七百零一年，人類分裂成兩個人種。他寫道，「漸漸地，我領悟到真理：人類不再是單一物種，而是分化成兩種截然不同的動物：我的上級世界的優雅孩子，不再是我們這個世代僅有的子孫；而這個閃過我眼前的那些漂白過的、可憎的夜行物，也是所有時代的子嗣。」

要看見人種的多樣化是可能的，只要看看家中飼養的狗。雖然狗有好幾千種，牠們都是灰狼（學名Canis lupus）的子孫。灰狼在冰河期末年，大約一萬年前被馴養。由於主人的選擇性育種，今日的狗呈現令人眼花

撩亂的各種大小和樣子。體型、脾氣、顏色和能力由於選擇性育種而有了根本的變化。

由於狗的老化速度比人類快七倍，我們可以估計出，狗自從與狼分開以後，大約已經存在一千個世代。我們將這一點應用到人類，那麼有系統地繁殖人類，將可在七萬年內將人類分裂成數千品種（breeds）——雖然他們仍然是相同的物種。如果運用基因工程，這個過程將會明顯加速，只要一個世代。

幸運的是，有幾個理由可以相信，人種的分化將不會發生，至少在未來一個世紀不會。在進化過程，一個單一物種如果因為地理因素分隔成兩個繁殖人口，通常會分裂成兩個品種。例如，這個現象就發生在澳洲，在那裡許多物種彼此分隔，導致許多動物進化成地球其他地方沒有的動物，例如有袋子的袋鼠。相對地，人類的人口高度遷移，沒有進化瓶頸，也高度融合。

如同加州大學洛杉磯分校的史托克曾說：「傳統的達爾文進化，現在沒有對人類造成任何改變，在可見的未來可能性也不大。人口數量太大，又混雜在一起，而選擇的壓力太過區域化，時間也很短暫。」

還有來自「洞穴人原則」的束縛。

如同我們前已提及，人類的本性在過去十萬年以來，仍然維持相對常態。若與人性衝突，人們往往會排斥科技的進步（例如無紙辦公室）。人們可能不願意訂做一個被設計出來的、脫離正軌的、可能被同儕看成怪胎的孩子。這會降低他們在社會上成功的機會。幫孩子穿上奇裝異服是一回事，但永遠改變他們的遺傳則截然不同。（在自由市場，怪基因可能有其立足點，但將會很小，因為市場將由消費者的需求驅動。）比較可能的是，到了世紀末，一對夫婦將會有一個基因資料庫供他們選擇，主要是為了剔除遺傳性疾病，但也有一些增強基因的選擇。然而，由於怪異基因的需求實在不多，來自市場要求以經費支援怪異基因的壓力將很小。

來自消費者需求的真正危險不會很多，但專制政府可能會利用基因工程，以達到他們的目的，例如生育較強壯而又服從性高的士兵。

另有一個來自遙遠未來的危險漸漸升高。當我們在另一星球有了太空殖

民地，那裡的引力和氣候條件與地球大不相同。到那時候（也許是下個世紀），考慮以基因工程，培育可以適應不同的引力場和氣候條件的新人類，就會變得實際。例如新培育的人類，也許能因應不同長短的一天，吸收不同數量的氧氣，也有不同的體重和代謝作用。但是，太空旅行在未來很長的一段時間都會很昂貴。在本世紀之末，我們在火星也許會有一個小小的前哨基地，但絕大多數的人類仍將留在地球。未來數十年到一世紀，太空旅行仍然是太空人和有錢人的事，另外也許還有少數太空殖民的死硬派。

所以人種分裂成各種太空品種，在太陽系各處殖民，甚至離開太陽系發展的事，在本世紀、甚至下一個世紀，仍不會發生。在可預見的將來，除非太空科技有重大突破，我們大部分人都會留在地球。

最後，在我們到達二一○○年以前，我們還要面臨另一個威脅：這個科技將會被精心運用，以設計的細菌戰爭來對付我們。

細菌戰爭

細菌戰爭與聖經一樣久遠。古代武士往往將染病的屍體，猛力投到敵人城牆內。或以染病的動物肢體在井中下毒，蓄意把感染天花的衣物交給對手，這是摧毀他們的另一招。但是有了現代科技，細菌可以改用基因繁殖法，消滅數百萬人。

一九七二年，美國和前蘇聯簽訂一個歷史性條約，禁止為了攻擊的目的而使用細菌戰爭。不過，現代生物工程技術實在太過進步，以致這個條約已經失去意義。

第一，對DNA的研究而言，並無所謂攻擊性或防禦性科技。基因的操縱兩者均可使用。

第二，使用基因工程創造出來的武器化細菌，可能因為被蓄意修改而更加致命，或更有能力散布開來。曾有人相信，只有美、蘇兩國持有最後一瓶裝著天花的瓶子。而天花是人類歷史上最大的殺手。一九九二年，蘇俄叛逃人員聲稱，蘇俄擁有天花武器，而且事實上已經製造多達二十噸。隨著蘇聯的解體，人們更擔心，有一天恐怖團體可能付錢得到已經武器化的天花。

二○○五年，生物學家成功地使一九一八年的西班牙流感病毒復活。這種病毒殺死的人比第一次世界大戰殺死的還要多。令人矚目的是，他們透過分析死後埋葬於阿拉斯加永凍層的一個婦女，和取自疾病肆虐時的一些美軍樣本，就能使病毒復活。

這些科學家接著將此一病毒的基因組刊登於網站上，對全世界公開。許多科學家對此感到不安，因為將會有一天，連一個能夠使用大學實驗室的大學生，都可能使人類有史以來最大的兇手之一重生。

在短期內，西班牙感冒病毒成為科學家的寶礦，他們可以接著檢查這個基因，以揭開長久以來的謎題：一個小小的變異，如何導致人類的廣大損傷？答案很快地發現了。這種西班牙感冒病毒，跟其他變種不一樣，它會導致人體免疫系統過度反應，釋放最終會殺死病人的大量液體。病人實質上是被自己的液體溺死的。一旦這點被了解，這個造成致命效果的基因，可以和H_1N_1及其他流感病毒作比較。幸而，它們都未帶有這種基因。還有，我們可以實際計算出一個病毒距離達到這種告急的能力還有多遠，而H_1N_1感冒病毒離開達到這種能力還很遠。

但是長期而言，還是要付出代價。每過一年，要操縱活的有機體基因就越加容易。成本繼續下降，而資訊在網路門戶大開。

某些科學家相信，在數十年內，有可能創造出一種機器，只要你把想要的成分輸入，它就會幫你創造出任何基因。打進這些組成基因的A-C-T-G符號，機器就會自動切割DNA創造出基因。果真如此，那麼有朝一日，可能連高中生都能進行生命形式的先進操作。

有一個人類惡夢中的情景是︰以空氣傳播愛滋病。例如，感冒的病毒含有一些可以在霧化滴液中存活的基因，因而打噴嚏就能感染別人。目前，愛滋病毒在暴露於環境中時還很脆弱。但如果感冒病毒的基因被植入愛滋病毒中，那麼可以想像，它們可能使愛滋病毒能在人體外存活。這樣就可能導致愛滋病毒像普通感冒一樣傳播，因而感染更多的人。我們也知道，細菌和病毒有可能交換基因，所以愛滋病和普通感冒病毒也有自然地交換基因的可能，雖然機會不高。

在未來，恐怖團體或國家可能有能力拿愛滋病當武器。唯一防止他們解開韁繩的東西，就是一旦病毒散布於環境中，他們自己也會慘死的這個

事實。

這個威脅就在九一一悲劇發生後，立刻變成事實。一個匿名者郵寄了一批含有炭疽病孢子（anthrax spores）的白色粉末小包裹，給世界各地的著名政治家。據細膩的顯微分析顯示，這些炭疽病孢子，已經被武器化，以達最大致命和毀壞效果。突然間，整個國家陷入恐懼，唯恐那些恐怖分子已經掌握先進的生物武器。雖然炭疽病毒在我們的環境中到處都可以發現，但只有受過訓練而且喪心病狂的人才會加以提煉，並把它當成武器，付諸實踐。

雖然經過美國歷史上最大的搜索，至今仍未發現罪犯蹤影（雖然一個主要嫌疑人最近自殺了）。我要說的重點是，只要有一個受過先進生化訓練的人，就能使整個國家陷入恐懼。

有一個細菌戰爭的抑制因素純屬自我利益。在第一次世界大戰中，戰場上使用毒氣的成效並不明顯。風向條件往往難以預期，所以毒氣可能吹回自己的軍隊。它的軍事價值主要是用來恐嚇敵人，而非打敗他們。並無任何大戰役是因為毒氣的使用而贏得。而且即使在冷戰的高潮，雙方都知道毒氣和生物武器在戰場可能產生難以預期的後果，也很容易升高為核子衝突。

本章提及的全部論點，都涉及基因、蛋白質和分子的操控。因此，下一個問題自然浮現：我們對個別原子的操控會到什麼程度？

第四章　奈米科技——萬物始於虛無？

就我眼光所及，物理學原理並未限制操縱個別原子的可能。

——理查‧費曼，諾貝爾物理學獎得主

奈米科技給我們操弄大自然終極玩具盒的工具——原子和分子。萬物都是由這些組成，而創造新東西的可能性也無窮盡。

——霍斯特‧史托莫（Horst Stormer），諾貝爾物理學獎得主

極度細小的角色就是無限大。

——路易斯‧巴斯德（Louis Pasteur）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

體內的奈米機器／摧毀癌症細胞／我們血液中的奈米汽車／DNA晶片／碳奈米管／後矽時代／原子電晶體／量子電腦

世紀中期（二○三○—二○七○）

變形

遙遠未來（二○七○—二一○○）

聖杯：複製機／建造複製機

灰色黏質？／複製機的社會影響

能夠熟練地掌握工具就是人之所以與動物有別的最高成就。依據希臘羅馬神話，這個過程開始於普羅米修斯（Prometheus），他因為同情人類

的苦境，從火神的熔爐中偷了火這種貴重禮物。但這個偷竊行為觸怒了眾神。為了懲罰人類，宙斯設計了一個聰明的詭計。他要求火神用金屬鍛造了一個盒子和一個漂亮的女人。火神創造了這個稱為潘朵拉（Pandora）的雕像，然後以魔法讓她有了生命，並告訴她不可以打開這個盒子。有一天，在好奇心的驅使下，她打開了盒子，於是被關在其中的讓全世界混亂、悲傷和痛苦等各種風都被釋放了，只留下希望在盒子裡。

所以，從火神的熔爐中浮現的，兼有人類的夢想與痛苦。今天，我們正在設計革命性的由個別原子打造的新機器，作為我們的終極工具。但是，它們會釋放火的啟發性和知識，還是混亂的風？

在人類的歷史進程，工具的掌控已經決定了我們的命運。當弓與箭在數千年前達到完美時，那表示我們可以將物體發射到用人手投擲所不及之處，也改進了我們的打獵效能，並增加了食物的供應。當冶金術在七千年前發明以後，那意味著我們可以不再居住於泥土和茅草小屋，終至建造出矗立地表的大建築。很快地，帝國開始運用金屬鍛造的工具，從森林和沙漠中興起。

而現在，我們就處在掌控具有空前力量的另一類型的工具邊緣。這一回，我們將能控制形成萬物的原子本身。本世紀之內，我們可能擁有想像中最重要的工具——允許我們操控個別原子的奈米科技。當分子工廠創造了我們今日只能夢想的物質（超級強韌、超輕，且有令人驚奇的電與磁的性質）時，它可能引起第二次工業革命。

諾貝爾獎得主理查德‧斯莫利（Richard Smalley）曾說：「奈米科技最大的夢想，就是能以原子當做建築方塊進行建構。」惠普公司的菲利普‧奎克斯（Philip Kuekes）說：「最後，目標不僅僅是要建造塵粒般的小電腦，這個構想將是建立細菌大小的簡單電腦。然後從塵粒大小的電腦，就可以獲得現在桌上型電腦的威力。」

這並非過度樂觀的希望。美國政府以嚴肅態度接受這樣的想法。二○○九年，由於奈米科技在醫藥、工業、航空以及商業上的巨大潛能，國家奈米科技計畫（National Nanotechnology Initiative）已提供十五億美元的研究經費。政府的國家科學基金會奈米科技報告說：「奈米科技有潛力可以增進人類表現，帶來可以永續發展的物質、水、能源和食物，以及

保護我們對抗未知的細菌與病毒……。」

最終，世界經濟和各國的命運可能要依賴它。二○二○年左右或更早，摩爾定律開始衰微，並可能終於崩潰。除非物理學家能夠發現適當的矽晶替代物來推動電腦，世界經濟可能跌入災難。這個問題的解決可能來自奈米科技。

也許就在本世紀末，奈米科技將會創造出一種只有上帝能使用的機器，能夠從幾乎完全虛無之中創造出任何東西。

量子世界

第一個呼籲注意這個新的物理領域的人，是諾貝爾獎得主理查‧費曼。他問了一個看似簡單的問題：你可以把機器做到多小？這不是一個學術性問題。電腦越做越小，持續改變工業面貌，所以顯然地，這個問題的答案也會對社會和經濟有巨大的影響。

一九五九年，費曼對美國物理學會以「底部的空間還很大」（There's Plenty of Room at the Bottom）為題，發表預言式談話。他說：「那是很有趣的，原則上，我認為物理學家有可能合成任何化學家寫下的化學物質。只要下訂單，物理學家就能合成。如何達成呢？把原子放在化學家說的地方，然後你就做出了物質。」費曼下結論說，由個別原子造成的機器是可能的，但新的物理定律會使它們非常難以製造（但非不可能）。

所以，最終世界的經濟和國家的命運，可能要仰賴奇異的和違反本能的量子論原理。我們會理所當然地認為事物如果只是縮小規模，物理的法則仍然不變。但這不正確。我們在電影如迪士尼的《親愛的，我把孩子縮小了》（Honey,I Shrunk the Kids）和《不可思議的縮小人》（The Incredible Shrinking Man）中，獲得了不正確的印象，以為縮小的人會經驗與我們相同的物理法則。例如，在迪士尼電影中，被縮小的主角在暴風雨中騎著螞蟻。雨滴落在地面，造成了小水窪——如同我們的世界一般。但在實際情況，雨滴可能大於螞蟻。所以當螞蟻遭遇雨滴時，牠可能看到一個巨大的水半球。這個水半球不會崩潰，因為表面張力如同一個網維持了水滴的完整。在我們的世界，水的表面張力很小，所以我們不會注意它。但以螞蟻的尺寸來說，表面張力等比強烈，所以雨點會

變成很多小水珠。

進一步地，如果你試著把螞蟻放大至馬的大小，會發生另一個問題：它的腳會斷掉。在你增加它的尺寸時，它的體重的增加超過腳的強度。如果尺寸以十為基準，那麼它的體積（亦即重量）就是10×10×10＝1,000倍重。但它的力量與肌肉的密度有關，所以它只有10×10＝100倍力量。因而巨蟻相對而言便是弱於普通螞蟻十倍。這也意味著金剛不但無法造成紐約市的恐慌，當牠要爬上帝國大廈時，牠自己會粉碎。

費曼也指出，在原子的層次，還有別的力量在支配著，例如氫結合和「范德華作用」（van der Waals Force）——由原子間和分子間逸出的微小電力。許多物質的物理特性都由這些力決定。

（說得更具體一點，思考一個簡單的問題：為什麼美國東北部的公路有那麼多坑洞？因為每年冬天，水滲進柏油路面的小裂縫。當它冰凍時水就擴張導致柏油破碎，形成坑洞。但想像水在冰凍時擴張卻違反了普通常識。水的膨脹是因氫的結合。水的分子結構像是V形，而氧在基部。水的分子在底部微帶負電，頂部則帶正電。因而，當你把水冷凍，堆疊水分子，它們就擴張，形成規律的冰柵格，在分子間留下很多空間。水的分子排列如六角形。水在冷凍時會膨脹，是因為在六角形裡，原子之間有較大空間。這也就是為什麼雪花是六角形，也解釋了為什麼冰浮在水面，而非按照道理沉下去。）

穿牆而過

在原子的層次，除了表面張力、氫結合和范德華作用，還有奇異的量子效應。在正常的情況下，我們在日常生活中看不到量子力量的作用。但量子力無所不在。例如，按理說，由於原子大部分是空的，我們應當可以直接穿過牆壁，走到另一邊。在原子中間的核和電子殼之間，只是真空。如果原子是足球場的大小，那麼球場將是空的，因為原子核大約只有一粒沙那麼大。

我們有時會以簡單的實地示範讓學生大感驚奇。我們拿著蓋格計算數器（Geiger counter），將它放在一個學生面前，然後放一個無害的放射性小球在後面。學生會嚇一跳，因為有一些粒子正穿越他的身體，觸動了蓋格計數器，彷彿他大部分是空的。事實也是如此。

但如果我們大部分是空的，那麼為什麼我們無法穿過牆壁？在電影《第六感生死戀》（Ghost）中，派屈克‧史威茲（Patrick Swayze）演的角色被對手殺死，變成了鬼。每次他嘗試去撫摸他的未婚妻——由黛咪‧摩兒（Demi Moore）飾演——他就受到挫折。他的手通過了平常的物體，他發現自己並不是個實際的物質，只能輕飄飄地穿過堅硬的東西。在其中一景，他把頭伸入行進中的地下鐵中。車子疾馳而過時，他的頭還在裡面。但他沒感覺到任何東西。（電影沒有解釋，為什麼地心引力沒將他向下拉，穿透地板，落到地心。顯然地，鬼能穿過任何東西，除了地板。）

所以，為何我們無法像鬼一般，穿過實體物件？答案存在於一個奇怪的量子現象。「保利不相容原理」（Pauli exclusion principle）說到，沒有兩個電子可以存在於同一個量子狀態（同一軌域中的兩個電子自旋方向必相反）。因此，當兩個幾乎相同的電子接近時，它們互相排斥。這就是物體看來是堅固的理由，其實只是幻象。事實上，物質基本上是空的。

當我們坐在椅子上時，會以為我們與它接觸了。事實上，我們只是由於椅子的電子和量子力量的排斥，懸浮在它上方少於一奈米（nanometer，即十億分之一公尺）處。這意味著，不論何時我們「摸」某件東西，我們其實完全沒有直接接觸到，而是被這些微小的原子力分隔著。（這也意味著，如果我們能夠使不相容原理失效，那麼我們將能穿牆。不過，沒人知道如何辦到。）

不僅量子理論使原子無法互相壓碎，它還將原子綁在一起成為分子。想像在某一瞬間，一個原子就像一個小太陽系，眾星環繞著太陽。現在，如果兩個這樣的太陽系相撞，則星球若非互相衝進對方，就會向外飛向各個方向，導致太陽系崩潰。所以按照道理，當原子碰在一起時，它們應當崩潰。

事實上，當兩個原子非常接近時，它們不是彈開就是結合在一起，形成一個穩定的分子。原子能夠形成穩定的分子的理由，在於電子可以由兩個原子共享。正常情形下，一個電子被兩個原子分享是反常的。但由於海森堡不確定性原理，你無法確知電子在哪裡。原來它溢出到兩個原子之間，把它們拉在一起。

換句話說，如果你關掉量子理論，那麼你的分子會在互相碰撞時分開，而你會分解成粒子形成的氣體。所以量子理論可以解釋，為什麼原子可以結合成固體物質，而非瓦解它們。

這也是為什麼不會有「世界中的世界」的理由。有些人想像，我們的太陽系或銀河系，可能就是另外的某一巨大宇宙中的一個原子。事實上，那是電影《MIB星際戰警》（Men in Black）中的最後場景，整個已知宇宙事實上只是某些外星人球戲中的一粒原子。但，依據物理學，這是不可能的，因為當我們的大小層次改變時，物理的原理也會改變。規範原子的規則與規範銀河的規則完全不同。

量子理論的一些令人費解的原理如下：

☆你無法確知任何粒子的動量和位置——其中總是有不確定性。

☆從某種觀點看，粒子可以同時在兩個地方。

☆所有的粒子以不同狀態同時混在一起存在；例如，旋轉的粒子，可能是粒子中軸向上和向下同時並存的混合。

☆你可以消失，而在另一個地方出現。

所有這些陳述似乎很荒謬。事實上，愛因斯坦曾說：「量子理論越成功，它看起來就越荒唐。」無人知道這些怪理論從何而來。它們被認為理所當然，沒有解釋。量子理論有一個重要的意義：它是正確的。它的正確性已經被度量至百億分之一，使它成為有史以來最成功的物理學說。

我們在日常生活中不會注意到這些難以置信的現象，是因為我們是由無數的原子所組成，而這些效應，從某種意義來說，平均值達到平衡。

移動個別原子

理查‧費曼夢想有這麼一天，物理學家可以用個別的原子製造出分子。這在一九五九年，似乎不可能。但那夢想的一部分，現在已經實現。

當我造訪在加州聖荷西的IBM公司阿爾馬登研究中心（Almaden Research Center）時，有機會就近見證這一夢想的實現。我是要來見識一個不尋常的設備——掃描式穿隧電子顯微鏡（STM），它容許科學家看到並操作個別的原子。這個設備是由IBM的吉爾德‧賓尼格（Gerd Bining）和海因里希‧羅樂爾（Heirich Rohrer）所發明，他們因此贏得一九八六年諾貝爾獎。（我記得小時候，老師告訴我們說，我們不可能看到原子。他說，它們實在太小。那時候，我已經決定要成為一個原子科學家。我意識到，我會花一輩子的時間去研究某種我無法直接看到的東西。但今天，我們不但可以看到原子，還可以用原子小鉗子跟它玩呢。）

掃描式穿隧電子顯微鏡實質上並非顯微鏡。它類似老式電唱機。一個細針（針頭只有一個原子的寬度）通過被分析物質的上方。微細的電流從針上流過，通過這物質，到達設備的底部。當針通過目標，每通過一個原子，它的電流就略有改變。經過多次通過，機器印出令人震驚的原子外觀。顯微鏡用相同的針，不但能記錄原子，還能移動它。用這樣的方法，人們就能拼出字母，例如拼出IBM三個字母，甚至設計出由原子製造的機器原型。

最近的另一個發明是原子力顯微鏡（atomic force microscope），它讓我們更驚訝地看到一大堆原子的3D立體圖。原子力顯微鏡也是用針頭很細的針，但它用雷射光去照射。當針通過研究對象時，它輕輕搖動，而這動作會被雷射影像記錄下來。

原來要移動個別的原子並不難。我坐在一個電腦螢幕前，看到一系列的白色球，每一個代表大約一英吋寬的乒乓球。事實上，每一個球就是一個原子。我將游標放在一個原子上面，然後將游標移到另一個位置。我按下一個按鈕，啟動針去移動原子。顯微鏡再度掃描物體。圖像改變了，它顯示已經把球按照我想的位置移動了。

將一個原子移動到我要的位置，整個過程只花了一分鐘。事實上，我發現我能夠在三十分鐘內，在螢幕上用個別原子拼出一些字母。在一小時內，我能以十個左右的原子，完成比較複雜的類型。

我真的能夠移動個別的原子了！而那曾經是我以為不可能的事。我的心情久久無法平復。

人與奈米科技

雖然奈米科技還處於嬰兒時期，它已經在化學塗料方面造成激增的商用工業。只要在商品上噴灑薄薄的一層化合物（少數幾個分子厚），就能使它更耐髒或改變視覺效果。其他已有的商業應用包括：抗沾汙衣服、電腦螢幕增強、較強的金屬切割工具、以及抗刮傷塗料。在未來數年，將會有越來越多以微塗料改進品質的新穎商業產品上市。

就多數領域而言，奈米科技仍然是很年輕的科學。但有一方面的奈米科技已經開始影響每一個人，並繁榮起來，成為世界上有利可圖的四百億美元產值的工業，那就是微電機系統（microelectromechanical systems,MEMS），包含噴墨夾、安全氣囊感應器、和汽車及飛機回轉儀顯示器等等。微電機系統是很小的機器，小到可以輕易放入針頭。它們是以類似應用於電腦產業的蝕刻技術創造出來的。蝕刻對象不是電晶體，而是機械零件，製造出來的產品要用顯微鏡才看得到。

科學家已經製造了一個原子版本的算盤。在二○○○年，IBM蘇黎世研究實驗室以掃描式顯微鏡操縱個別原子，造成這種算盤。不用木頭珠子在垂直的金屬線上上下移動，原子算盤用的是巴克球（buckyball），由碳原子安排形成像是足球的分子，比人類頭髮寬度小五千倍。

在康乃爾大學，科學家甚至創造了一個原子吉他。它有六條弦，每條弦只有一百個原子寬。如果頭尾相接，二十個這種吉他放得進頭髮中。這個吉他是真的，有弦可以撥動，雖然它的頻率太高，無法讓人耳聽到。

此一科技最廣為流傳的實用產品，則是在安全氣囊上。它含有微型的微電機系統加速器，可以偵測汽車的突然煞車。這個微電機系統加速器含有一個附在彈簧或控制桿的顯微球。當你急踩煞車時，突然減速使球猛搖，它的運動創造了一個微小的電荷。這個電荷就觸發化學爆炸，在二十五分之一秒內釋放大量氮氣。這種科技已經解救了數以千計的生命。

世紀初期（現在—二○三○）

體內的奈米機器

在不久的未來，我們預期新而多樣性的奈米裝置，將會帶來醫療革命，

例如血流中的奈米機器巡航。在電影《聯合縮小軍》（Fantastic Voyage）中，一群科學家和他們的船被縮小到紅血球般的大小。他們的旅程會行經病人的血流和大腦，在人體內遭遇一系列的恐怖與危險。奈米科技的目標之一，就是創造分子獵人，讓它接近癌症細胞，並徹底摧毀它，而不傷及正常細胞。科幻作家長期以來都夢想到漂浮於血流中，不斷搜尋癌細胞的分子船，可以執行「搜索和摧毀」的任務。但批評者曾認為，這是科幻作家無根據的夢想，不可能實現。

這個夢想有一部分現在已經實現。一九九二年，紐約州立大學水牛城校區的傑羅姆‧沈塔格（Jerome Schentag）發明了前已提及的聰明藥丸，那是一個跟藥丸一樣大小，可以吞下肚，也可以電子追蹤的小儀器。它可以接受指示輸送藥物至適當地點。聰明藥丸裡裝有電視攝影機，進入胃部和腸道做體內攝影，磁鐵可以用來指揮它們。如此，這個儀器可以搜尋腫瘤和息肉。未來，它們有可能進行小手術，除去不正常的部分，並做切片檢查，而不須切開肌膚。

一種更小的儀器是奈米粒子（nanoparticle）。它是一種可以輸送攻擊癌細胞藥物至特定目標的分子，有可能造成癌症治療的革命。這些奈米粒子可以比擬為「分子聰明炸彈」，設計來裝載化學物質對特定目標進行攻擊，降低過程中伴隨的損傷。傻瓜炸彈什麼都炸（包括健康的細胞），聰明炸彈則有選擇性，只瞄準癌症細胞。

任何曾經體驗過化療副作用之可怕的人，都會了解這些奈米粒子減少痛苦的重大潛力。化療要讓全身浸在致命毒素中才能發揮作用，它只是殺癌症細胞比正常細胞稍微有效。化療的併發傷害極為廣泛。副作用（包括噁心作嘔、掉頭髮、軟弱無力等等）實在嚴重，以致有些病患寧可死於癌症，也不願接受這種凌遲。

奈米科技可以改變這一切。藥物（如化療藥物）可以放在藥丸形狀的分子中。然後讓這個奈米粒子跟著血流循環，直到它發現特定目標，才釋放藥物。

奈米粒子的關鍵就在它們的大小：在十至一百奈米之間，夠大而不致穿過血管壁。所以，奈米粒子會無害地從正常血液細胞彈開。但癌症細胞不同；它們的細胞壁散布著大而不規則的洞。奈米粒子可以自由進入癌細胞，把藥物送進去，卻不會傷及健康的組織。所以醫生不需要複雜的

指示系統，去引導奈米粒子到達目標。它們能夠在某些類型的癌症腫瘤中累積。

這種方式的美妙之處在於，它不需複雜又危險的方法，並招來副作用。這些奈米粒子大小恰到好處：太大而無法攻擊正常細胞，卻又剛好可以穿透癌細胞。

另一個例子是，在麻州劍橋市的BIND生物科技公司的科學家所研發的奈米粒子。那種粒子是由聚乳酸（polylactic acid）和甘醇酸（glycolic）聚合而成，可以在內部的分子篩孔存放藥物，創造出了有效載荷。這個奈米粒子的導引系統是包住粒子的縮氨酸（peptide，簡稱肽），它可與標的細胞進行特殊的結合。

這個發明最吸引人的地方在於，奈米粒子自己形成，不需複雜的工廠和化學設備。不同的化學物質在嚴格控制條件下以適當的順序慢慢混合，自行結合成奈米粒子。

「由於自行結合不需多重複雜化學步驟，這些粒子很容易製造……我們可以造出以公斤計量的產品，這是前所未有的事。」BIND生物科學公司的歐米德‧法羅克札德（Omid Farokhzad）說。他也是哈佛大學醫學院醫師。這些奈米粒子已經證實在對抗老鼠的前列腺、乳房、肺等癌症腫瘤有價值。透過染料的使用，可以顯示這些奈米粒子聚積在有問題的器官上，以我們希望的方式釋放攜帶的藥物。人類病患臨床試驗將會在近幾年開始。

摧毀癌症細胞

這些奈米粒子不但能找到癌症細胞送達藥物去殺它們，事實上它本身也能就地殺死癌症細胞。背後的原理很簡單。奈米粒子可以吸收某一頻率範圍的光，若將雷射光聚焦於它們，它們溫度增高或震動，就會破壞癌細胞的細胞壁，因而消滅任何附近的癌細胞。重點就是把這些奈米顆粒送到離癌細胞夠近的地方。

已有幾個團隊研發出原型。在阿岡國家實驗室（Argonne National Laboratory）和芝加哥大學的科學家，已經創造出二氧化鈦的奈米粒子（二氧化鈦是一種在防曬劑中發現的普通化學物質）。這個團隊已經將

這些奈米粒子，與一種會自動尋找某種被稱為膠質母細胞（glioblastoma mutiforme,GBM）的癌細胞之抗體結合。所以，這些奈米粒子搭上抗體的便車，就被帶到癌細胞處。然後，以白光照射五分鐘，逐漸加熱，終至殺死癌細胞。研究已經顯示，有百分之八十的癌細胞都可以用這種方法殺死。

這些科學家又設計了第二種殺死癌細胞的方法。他們創造出很小的、會劇烈震動的磁盤。一旦這些磁盤被帶到癌細胞那兒，一個很小的外來磁場可以通過它們，造成它們的震動，撕裂癌細胞的細胞壁。在試驗中，僅僅經過十分鐘的震動，就有百分之九十的癌細胞被殺死。

這個結果並非偶然。加州大學聖塔克魯茲分校的科學家，已經用黃金的奈米粒子設計出一個類似的系統。這些粒子只有二十至七十奈米寬，少數幾個原子厚，排列成球體。科學家使用的是某些特定的縮氨酸——它以易被吸引到癌細胞著稱。將縮氨酸與黃金奈米粒子結合，然後將結合物帶至老鼠的皮膚癌細胞。經過紅外線照射，這些金粒子會將腫瘤細胞加熱，然後殺死它們。研究員之一的張進（Jin Zhang）說，「基本上就像是把癌細胞放進熱水，將它們燙死。奈米粒子產生的溫度越高越好。」

所以，在未來，奈米科技將在癌細胞發展成腫瘤以前數年甚至數十年前，偵測出它們的地盤，而循環於血液中的奈米粒子將會用來摧毀它們。這個科學基礎已於今日奠立。

我們血液中的奈米汽車

奈米粒子之外再進一步，就是奈米汽車（nanocar）。當它在體內旅行時，可以真正被引導。奈米粒子被容許在血流中自由循環，而這些奈米汽車就如同遙控無人飛機，可以操縱並駕駛。

萊斯大學的詹姆斯·涂爾（James Tour）和他的夥伴，已經做出這種奈米汽車。它的輪子，被四個巴克球（完全由碳分子組成的中空圓球）取代。這個研究的未來目標之一，是設計可以在血流中推動微型機器人的分子汽車，沿途摧毀癌細胞，或輸送救命藥物至身體中的確定位置。

但分子汽車的問題之一是：它沒有引擎。科學家已經創造出越來越多精

密的分子機器，但分子動力來源的創造，一向是主要的障礙之一。大自然已經透過以三磷酸腺苷（adenosine triphosphate,ATP）分子作為它的能源，來解決這個問題。ATP的能量使生命成為可能。它隨時都在為我們的肌肉運動提供能量。ATP的能量是儲存於原子之間的原子連結中。但創造出合成的替代物已被證明有困難。

賓州大學的湯瑪斯‧馬洛克（Thomas Mallouk）和阿育斯曼‧沈（Ayusman Sen），發現這個問題可能有解。他們創造一輛可以真正每秒移動數十微米的奈米汽車，與多數細菌的速度相同。（他們用黃金和鈦造出細菌大小的奈米棒，把它放進水與過氧化氫的混合物中。奈米棒的兩端產生化學反應，導致質子從一端跑到另一端。由於質子推動水分子的電荷，就會推動奈米棒前進。只要水中還有過氧化氫，奈米棒就會繼續前進。）

使用磁力也有可能引導這些奈米棒。科學家將鎳片嵌進這些奈米棒，使它們能像磁針一般活動。只要在這些奈米棒旁邊移動普通磁鐵，你就能將它們導向你要的方向。

另外還可以用閃光燈來引導分子機器。光可以將分子分解成正、負離子。這兩類離子透過媒介物以不同速度散布，形成電磁場。因而分子機器被這些電磁場所吸引。所以人們可以用閃光燈定向，引導分子機器前進。

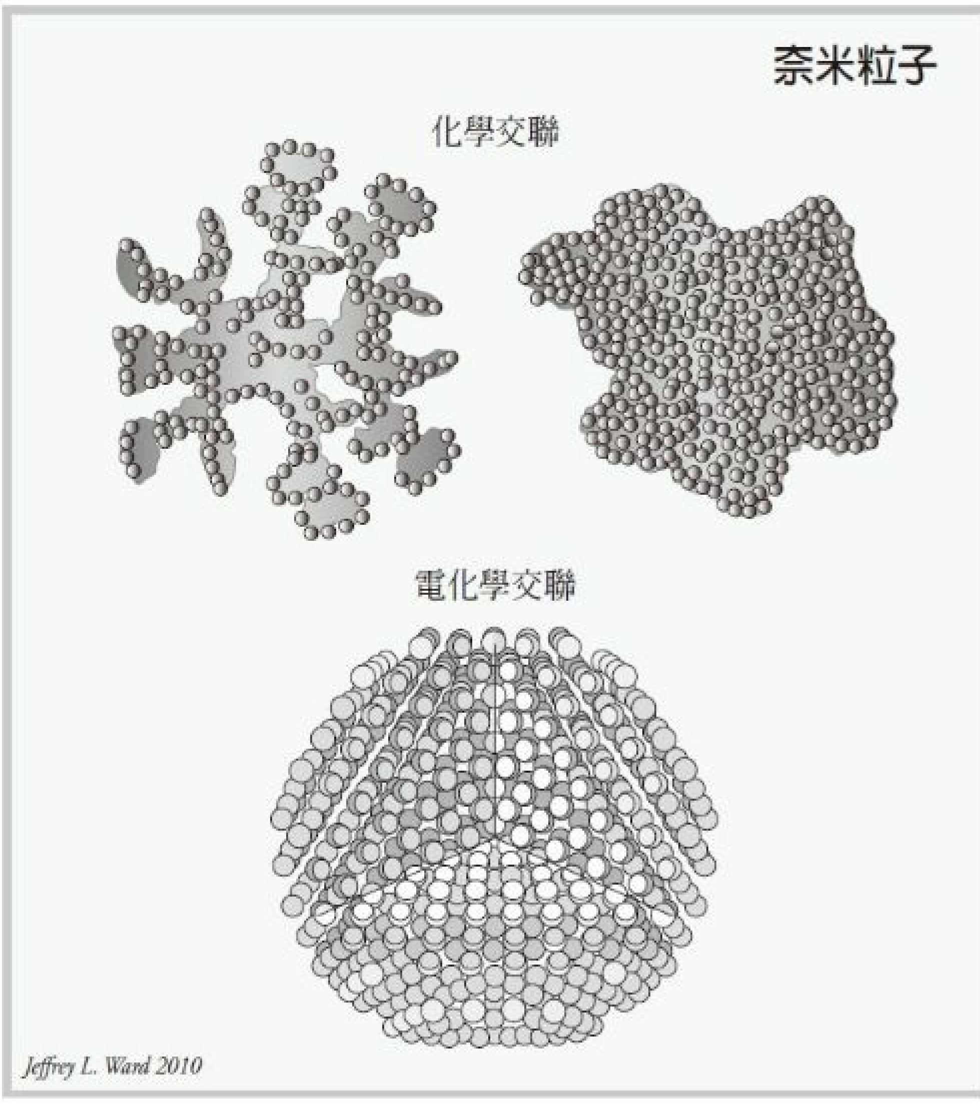
當我訪問加拿大蒙特婁理工學院斯凡‧馬特爾（Sylvain Martel）的實驗室時，我看到一次實際示範。他的觀念是用普通細菌的尾巴，來推動一個小晶片在血管中前進。到目前為止，科學加還沒有辦法製造出如同在細菌尾巴所見到的原子馬達。馬特爾問自己：如果奈米科技無法製造這些小尾巴，為什麼不利用活細菌的尾巴？

他首先製作一個比小逗點還小的晶片。然後培養一批細菌。他設法將大約八十隻細菌放在晶片後面，所以它們的作用就像推動器一樣，可以把晶片向前推。由於這些細菌帶有一點點磁性，馬特爾可以用外在的磁鐵，把它們引導到任何他想要的方向。

我有機會親自帶領這些由細菌推動的晶片。我往顯微鏡看進去，可以看見一個微小的電腦晶片正由數個細菌推動著。當我按下一個按鈕，一個磁鐵開始開始產磁性，而晶片向右移動。當我把按鈕放開，晶片停止

了，然後隨機移動。就這樣，我的確能夠引導晶片。在做這件事時，我了解到，有一天，醫生將會按一個相似的按鈕，但這次是第一次在病人血管裡引導奈米機器人。

我們可以想像一個未來，外科手術完全被在血流中穿梭的分子機器取代。它們由磁力指引，朝著生病的器官運動，然後釋放藥物或進行手術。這會使剖開肌膚的外科手術成為絕響。或者，磁力可以引導這些奈米機器到心臟，除去血管中的阻塞物。



圖說：分子機器人將在我們的血流中巡邏，指認並摧毀癌症細胞和病源體。它們將會帶來醫療革命。

DNA晶片

在第三章曾經提及，未來我們的衣服、身體和浴室裡面會有微細的感應器，不斷地監控著我們的健康，並在癌症等疾病變為危險以前好幾年，就將它們偵測出來。要達成這個目標，關鍵就在DNA晶片——它可以達到「晶片即實驗室」，如同《星艦迷航記》中的「三度儀」——這些微小的感應器將在數分鐘內，為我們做完醫療分析。

今天，篩檢癌症是一個耗時、昂貴又費力的過程，往往需要好幾星期。這一點大大地限制了進行癌症分析的數量。現在科學家已經製造出儀器，可以透過檢查癌細胞產生的特定生物標誌，快速又經濟地偵測癌症。

運用與電腦晶片相同的蝕刻技術，可以蝕刻出一種晶片，內含只有顯微鏡才看得到的部位，可以偵測特定DNA的排序或癌症細胞。

使用電晶體蝕刻技術，DNA的片段被附著於晶體。當液體流過晶體，這個DNA片段可與特定基因排序連結。然後再用雷射光，我們可以迅速掃描整個位置，認出基因。依照這種方式，基因不需一個個閱讀，而可一次掃描千萬個。

一九九七年，昂飛公司（Affymetrix）發表第一個商業化的DNA晶片，可以迅速分析五萬種基因排序。到二○○○年，可以提供四十萬種基因檢查，每種花費只要數千美元。到了二○○二年，價格降至二百美元，提供的晶片甚至更強有力。依據摩爾定律，價格會繼續滑落至僅僅數美元。

多倫多大學醫學院教授夏那·凱利（Shana Kelley）說，「今天，若要評估癌症生物標誌的臨床相關樣本，需要堆滿一整個房間的電腦，而且結果無法迅速取得。我們的團隊，可以在一個指尖大小的晶片上測量生物分子。」她也展望有一天，分析這個晶片的全部設備將會縮至手機的大小。這個晶片上的實驗室意味著，我們可以將一個在醫院或大學看到的化學實驗室，縮小至單一晶片，讓我們在浴室也能使用它。

麻州總醫院的醫師，已經創造出他們的客製化生物晶片，威力比任何市售產品高一百倍。正常情況下，循環腫瘤細胞（circulating tumor

cell,CTCs）在我們血液中的細胞數量少於百萬分之一。一旦這些腫瘤細胞開始增殖，最終會要了我們的命。這個新的晶片很敏感，可以發現血液中十億分之一的循環腫瘤細胞。結果，這個晶片已證實可以透過分析少於一湯匙的血液，偵測出肺、前列腺、胰臟、乳房以及直腸等的癌細胞。

標準化的蝕刻技術做出的晶片，含有七萬八千個微細短棒（每一個長一百微米）。在顯微鏡下，它們像是一個圓棒森林。每一根短棒塗著一個上皮細胞黏附分子（epithelial cell adhesion molecule,EpCAM）的抗體，EpCAM可於許多癌症細胞發現，而正常細胞則沒有。它在癌細胞發展成腫瘤時，扮演活躍的彼此溝通的角色。如果血液通過這個晶片，CTC細胞會黏在短棒上。在臨床試驗中，一百一十六個病人裡，有一百一十五個被成功地測出癌症。

這些晶片上的實驗室的擴散，將會迅速降低診斷疾病的費用。現在，一次切片檢查或化學分析可能需要好幾百美元，並且需要好幾星期。未來，可能只要花幾分錢和幾分鐘。這可以徹底改變癌症診斷的速度，並且人人付得起。每一次刷牙時，我們都可以徹底檢查多樣疾病，包含癌症。

華盛頓大學的萊洛伊‧胡德（Leroy Hood）與研究夥伴創造了一種晶片（約四公分寬），可以從一滴血裡面測出特定的蛋白質。蛋白質是建構生命的積木，我們的肌肉、皮膚、毛髮、賀爾蒙和酵素都是由蛋白質造成。偵測來自疾病（如癌症）的蛋白質，可以導致身體的早期警報系統。目前，每個晶片只要花美金十分，可以在十分鐘內找到特定的蛋白質，所以它的有效性比以前的系統好了好幾百萬倍。胡德預見到有一天，晶片將可迅速分析數萬種蛋白質，在許許多多疾病變得嚴重之前好幾年，就對我們提出警告。

碳奈米管

碳奈米管（carbon nanotubes）讓我們提早一窺奈米科技的威力。原則上，碳奈米管比鋼還堅固，也能導電，所以用碳做基本材料建構電腦有其可能。它們雖然極度堅固，卻有一個問題：它們必須是純碳形式，而最長的純碳纖維只有數公分長。但總有一天，電腦可能由碳奈米管和其

他分子結構製成。

碳奈米管是由個別的碳原子連接形成管狀。想像一個做雞欄的六角形網眼細鐵絲網，每一個接合部位都是一顆碳原子。然後把這個鐵絲網捲起來成為管狀，你就會有幾何圖形的碳奈米管，但科學家從未想到碳原子可以用這種新穎的方式結合。

碳奈米管近乎奇蹟的特性，力量來自它們的原子結構。通常，當你分析一片如岩石或木頭的固體時，你事實上是在分析許多互相交疊結構的巨大合成物。在這合成物中很容易產生裂縫，因而導致破裂。所以，一種物質的強度，取決於其分子結構的不完美性。例如，石墨由純碳組成，但它極度鬆軟，因為它由好幾層構成，而各層間很容易滑動。每一層含有許多碳原子，其中每一個原子都與其他三個碳原子連結。

鑽石也是由純碳組成，但它們是自然形成的礦物中最堅硬的。鑽石內的碳原子以緊密的、互相鎖著的結晶結構排列，給它們異常的強度。類似地，碳奈米管的神奇特性，也來自它們規則的原子結構。

現在，碳奈米管已經被找到許多工業上的應用。由於它們的導電性，它們可以製造電纜以輸送大量電力。且由於它們的強度很高，使它們可以用來製造比製造防彈衣的克維拉（Kevlar）更堅固的物質。

但是，碳最重要的應用可能是在電腦事業。它是少數可以成功地取代矽，作為電腦科技基礎的角色的候選物質之一。未來的世界經濟，最後可能要決定於：誰將取代矽？

後矽時代

如同先前提及，作為資訊革命的基礎之一的摩爾定律，不可能永遠存在。世界經濟的未來和國家的走向，最終關鍵點在於哪個國家發展出矽的替代物。

摩爾定律何時會崩潰？這個問題會震動整個世界經濟。二○○七年，戈登‧摩爾本人被問到，他是否認為這個以他為名的頌揚性定律可以長存。他說，當然不會，並且預測它會在十至十五年內結束。

這個粗略的評估，與先前英特爾的技術策略總監保羅‧賈吉尼（Paolo Gargini）所作預估一致。因為英特爾公司設定整個半導體工業的步調，他的話是經過細心分析的。在二○○四年西部半導體會議中，他說：「我以為至少在未來十五年至二十年，我們可以繼續維持摩爾定律。」

現在以矽為基礎的電腦革命，是在一個最重要的事實驅動之下：紫外線在矽晶圓上蝕刻越來越小的電晶體的能力。今天一個奔騰晶片，在一個拇指甲大小的晶圓上，可以有數億個電晶體。因為紫外線的波長可以小至十奈米，所以要用蝕刻技術刻出只有三十個原子寬的零件是有可能的。但這個過程無法永遠繼續。它遲早會崩潰，理由如下。

第一，強大的晶片產生的熱量，最後會熔毀自己。一個天真的解決方法是把晶圓堆疊起來，成為立體晶片。這將會增加晶片的運算力，但要以製造出更多熱量為代價。來自這些立體晶片的熱量熱到可以在上面煎蛋。問題很簡單：沒有足夠的表面可以冷卻。一般而言，當你讓冷水或空氣通過晶片時，如果晶片的接觸面較多，冷卻效果就比較好。但如果你用的是立體晶片，接觸面是不夠的。例如，如果將晶片大小加倍，它產生的熱增加系數是八（因為這個立方體含有八倍的電子零件），但表面區域的增加系數卻只有四。這意味著立體晶片產生的熱量快於冷卻它的能力。立方越大，越難冷卻。所以，立體晶片只能為這個問題提供部分的、暫時的解決。

有些人建議，我們乾脆用X光，而不用紫外線去蝕刻電路。原則上，這是行得通的，因為X光的波長可以小於紫外線一百倍。但結果得失參半。當你改用X光時，你也增加了光線的能量系數約達一百。這意味著用X光蝕刻，可能毀了晶圓。X光平板印刷術就像藝術家用火焰器去創造精細的雕刻。所以這種蝕刻方法必須小心控制，它也只能是暫時性方法。

第二，有一個由量子理論而來的基本問題：不確定性原理，也就是說，你無法確定任何原子或粒子的位置和動量。今日的奔騰晶片一層可能有三十個原子厚。到了二○二○年，可能一層厚度只有五個原子，所以電子的位置並不確定，因而開始漏出，導致短路。因此，電晶體可以做到多小，有其量子限制。

如同我前面所說，我曾在西雅圖微軟總部的一個重要會議中做主題演

講，與會者有三千個高階工程師。我在那裡點出了摩爾定律減緩的問題。這些高階工程師對我透露，他們已經在正視這個問題，而平行處理就是他們增加處理速度的主要答案。最簡單的方式就是把一系列的晶片平行並聯，將電腦要解決的問題分割成數個片段，最後再接起來。

平行處理就是我們的大腦進行工作的關鍵。如果你在它思考的時候用磁振造影掃描，你會發現大腦的不同地區同時亮起來，那表示大腦把工作分成小片段，同時處理每個片段。這解釋了為什麼神經元（以令人難以忍受的每小時二百英里的緩慢速度傳送電子訊息）可以超越超級電腦（在其中，訊息以接近光速傳遞）。我們的大腦缺少速度，卻以同時進行數十億次的小量計算，然後加起來，結果遠超過彌補不足。

平行處理的困難在於，每一個問題都必須分割成數個片段。每一個片段交由不同的晶片處理，而問題就在最後的組合。這種分離處理的互相聯繫工作非常複雜，且因問題而有差異，使得通用程序很難找到。人腦不需費力就能處理，但那是因為大自然有好幾百萬年可以解決這個問題。軟體工程師只有大約數十年。

原子電晶體

矽晶片的一個可能的替代者，是由個別原子作成的電晶體。如果矽晶因為晶片中的線路和疊層縮小至以原子為計算單位而失敗，那麼，為何不乾脆重來，以原子來運算？

實現這種觀念的方法之一，是使用分子晶體。電晶體是一種控制電流的開關。矽晶體有可能由輪烷（rotaxane）和苯硫酚（benzenethiol）之類的化學物質所形成的單一分子來取代。當你看到苯硫酚的分子時，它看起來就像是一個長管，中間有一個由原子組成的「旋鈕」或控制閥。正常情形下，電流可以自由地流經管子，使它成為傳導體。但也有可能轉動旋鈕，讓它關閉電流。就這樣，整個分子就像是一個可以控制電流的開關。在某個旋鈕容許電流通過的位置，代表1。如果旋鈕被轉動，電流被阻止，那就代表0。如此，數位訊息可以透過分子傳達。

分子電晶體已經存在。有數個公司宣布，他們已經創造出由個別分子做出來的電晶體。但他們要先設法正確地連接它們並且量產，才能談得上商業應用。

其中一個有成功希望的分子電晶體候選者，是來自一種被稱為石墨烯的物質。二○○四年，它首度由曼徹斯特大學的安德烈‧蓋姆（Andre Gaim）和康士坦丁‧諾沃席洛夫（Kostya Novoselov）自石墨分離出來，他們因此獲得諾貝爾獎。它就像是單層的石墨。碳奈米管是由多片碳原子捲成長而窄的管子，石墨烯則不同，它是單獨一片的碳，厚度不超過一個原子。它跟碳奈米管一樣，代表一種新的物質狀態，所以很多科學家正在用心梳理它的奇異特性，包括導電性。諾沃席洛夫指出：「從物理學觀點來看，石墨烯是一種珍貴的金礦，值得花一輩子去研究。」（石墨烯也是經科學測驗過的最堅固物質。如果你把一隻大象放在一枝鉛筆上，把鉛筆平衡地放在一片石墨烯上，石墨烯不會被撕破。）

諾沃席洛夫的團隊，已經應用電腦工業所使用的標準技術，蝕刻出一些有史一來最小的電晶體。窄幅電子光束可以在石墨烯上面蝕刻出小溝，造成世最小的電晶體：一個原子厚，十個原子寬。（現在，最小的分子電晶體約有三十奈米大小。諾沃席洛夫的最小電晶體，比它還小三十倍。）

這些石墨烯電晶體已經夠小，事實上可能代表分子電晶體的極限。任何更小的，就會被不確定性原理接管，電子也會漏出晶片，摧毀它的特性。諾沃席洛夫說：「那大約就是我們能取得的最小晶片。」

雖說另外還有一些分子電晶體的候選對象，但是真正的問題卻很平常：如何將它們連線組成可以商業應用的產品。光是創造出單一的分子電晶體是不夠的。分子電晶體以難於操縱著稱，因為它們可能比人類頭髮薄數千倍。思考它們的量產方法會使人做惡夢。現在，還沒有這種技術。

例如，石墨烯這種材料實在太新，科學家不知道如何大量製造。現在科學家只能做出大約○‧一公釐的純石墨烯，還談不上商業應用。如果能找到自我組合成為分子電晶體的程序，就比較有希望。在自然界，人類有時會發現大量分子，好像變魔術般，聚集成為確定的類型。但目前，無人能有效地重現此一魔術。

量子電腦

最具雄心的構想是使用量子電腦——它事實上是在個別的原子上運算。有人斷言，量子電腦就是終極電腦，因為原子是我們所能用來計算的最

小單位。

原子如同陀螺。在正常情況下，你可以把資訊儲存在陀螺上——如果陀螺向上旋轉就標示0，如果陀螺向下旋轉就標示1。如果你將陀螺翻轉，那麼你就已經把0轉為1，完成一次計算。

但是在量子的奇異世界中，一個原子可以在同一時間內既向上又向下旋轉。（在量子世界，同時在數個地方並不足為奇。）因而，一個原子可以包含比0與1更多的資訊。它可以描述0與1的多種不同組合。所以量子電腦使用「量子位元」（qubits）而非位元（bits）。例如，它可以百分之二十五向上轉而百分之七十五向下轉。如此一來，一個轉動的原子可以儲存比單一位元多很多的資訊。

由於量子電腦的運算力實在大得驚人，所以美國中央情報局已經在探究它們破解密碼的潛力。當中情局試突破解他國的密碼時，他們要找的是關鍵線索。例如，線索可能建立在分解一個很大的數字。例如，要把二十一分解成三與七很容易。假設你有一個百位數的整數，要求數位電腦將它分解成兩個整數。數位電腦可能要花費一世紀才能分解出來。但是，由於量子電腦運算力實在很強大，所以原則上它有能力輕易解開任何這類密碼。面對這類超大工作量，量子電腦可以快速表現出它遠比標準電腦優越。

量子電腦並非科幻小說，而是現在已經存在。事實上，我曾有機會訪問麻省理工學院賽斯‧羅伊德（Seth Lloyd）的實驗室，這裡是此一領域的開拓者之一，親眼目睹了量子電腦。他的實驗室擺滿電腦、真空唧筒及感應器。但他實驗的心臟，是一個類似標準型的磁振造影機器——除了體積小很多。他的裝置跟磁振造影機一樣，有兩個大線圈，可以在兩個圈圈之間，創造出統一的磁場。他把樣本物體放在磁場中。樣本中的原子如同陀螺般被校直。如果原子向上指，它就相當於0。如果原子向下指，它就相當於1。然後，他將一個電磁波脈動送進樣本，改變了原已調準一致的原子。某些原子翻轉過來，使1變成0。如此機器已經執行一次計算。

那麼，為什麼我們的桌上當還沒有量子電腦，可以解開宇宙的奧祕？羅伊德對我承認，阻撓量子電腦研究的真正問題，在於來自外在世界的干擾，摧毀了這些原子的微妙性質。

當原子間互相協調並一致地振動時，外界最微細的干擾就能摧毀這種微妙的平衡，使原子脫散，不再和諧共振。即使是宇宙射線，或實驗室外面卡車的呼嘯聲，也能破壞這些原子脆弱的調和運轉，因而也破壞了運算。

不和諧問題就是創造量子電腦的唯一最困難的障礙。任何人若能解決這個不和諧問題，不僅會贏得諾貝爾獎，而且也會成為世界上最富有的人。

你可以想像到，在原子間的單一和諧中創造出量子電腦有多艱鉅。因為這些原子會很快地變為不協調，並改變相位。目前，世界上在量子電腦上完成的最複雜運算是3×5＝15。雖然這好像沒什麼了不起，但請記得，這是以個別原子所做的運算。

另外，還有一個來自量子理論的怪異併發症。在量子電腦所做的所有運算都不確定，因而你必須重複驗算很多次。所以，最少會有幾次的結果是2＋2＝4。如果你重複計算2＋2好幾次，平均起來會獲得4的答案。所以，在量子電腦中，連計算也變得模糊。

沒有人知道，何時可以解決這個調和的問題。網際網路原創人之一的文特‧瑟夫（Vint Cerf）預言，「在二○五○年，我們肯定可以找到方法，達成室溫量子運算。」

我們也應當指出，由於賭注實在很高，所以已經有一些科學家從事探索，設計出不同類型的電腦。其中包括：

☆光學電腦：這些電腦用光束而非原子運算。因為光速可以交叉通過，光學電腦具有立體而不用電線的優點。還有，雷射可用與普通電晶體相同的平板印刷術編造出來，所以，理論上可以把數百萬雷射包裝在單一晶片中。

☆量子點電腦：晶片中所用半導體，可以蝕刻在只容得下一百個原子的一個小點上。在那一點上，原子可以開始一起振動。二○○九年，世界上最小的量子電腦是由單一電子造成。這些量子點已經用透光二極管（diode）和電腦螢幕證明它們的價值。未來，如果適當安排這些量子點，它們甚至可能造出量子電腦。

☆DNA電腦：一九九四年，南加州大學發明第一台由DNA分子組成的電腦。由於DNA的螺旋線在氨基酸上以A、T、C、G等字母儲存資訊，而非用0與1，所以DNA可以被視同普通的電腦資料帶，不同的是，它可以儲存更多的資訊。就如同很大的數位數字可以被電腦操作和重組，我們也可透過內含DNA（它可以用不同方式切開和接合）液體的不同試管的混合，執行類比操作。雖然過程緩慢，由於有無數的DNA分子同時運作，因此DNA電腦可以比數位電腦更方便地解決某些運算。不過，數位電腦相當方便，連手機內都可以放置，而DNA電腦則涉及含有DNA液體試管的混合，比較不方便。

世紀中期（二○三○–二○七○）

變形

在《魔鬼終結者二：末日審判》（Terminater 2:Judgement Day）中，阿諾‧史瓦辛格被來自未來的先進機器人T-1000（由液體金屬製成）所攻擊。這個機器人看來像是一團抖動的水銀，它可以改變形狀，滑溜地通過任何障礙。它可以從任何隙縫滲透過去，透過手腳的變形，形塑成致命武器。然後，它又可以突然重組成原來的樣子，繼續橫衝直撞的謀殺。這個T-1000看來像是所向無敵的完美殺人機器。

當然，所有這些都只是科幻小說。今日的科技還不能讓你隨心所欲地改變固體。但是到了世紀中期，某種形式的變形科技可能普遍存在。事實上，推動此一科技的重要公司正是英特爾。

有趣的是，到了二○五○年，多數奈米科技的成果將會無所不在，卻又潛藏難見。幾乎所有的產品都會透過分子製造技術加以增強，使他們特別堅固，有較佳的傳導性和彈性。奈米科技也會給我們遍布周圍、隱藏不見、讓我們無從察覺，卻隨時都在保護和幫助我們的感應器。我們將在街上行進，一切事物如常，因而並不會知道奈米科技是怎麼改變我們周邊的環境。

但是，有一個奈米科技的後果卻很明顯。

《魔鬼終結者》T-1000殺手機器人，可能是一個被稱為「可程式化材料」（programmable matter）的領域中最具戲劇性的例子。此一領域有

朝一日將允許我們，只要按一次按鈕，就能改變某一對象的形狀、色彩和物質形式。在一個初級的層次，連霓虹燈也是一種可程式化材料的形式，因為你可以輕按開關，就將電力通過管狀的氣體。電力激起了氣體的活力，氣體又衰退回復原來狀態，在過程中釋放出光線。一個比較精緻的版本是電腦螢幕中所見的LED顯示器。LED含有液體結晶，當小量電力通過時，變為不透光。如此，透過管制液晶中的電流，我們可以只按鈕一次，就能創造出色彩和形狀。

英特爾的科學家野心更大。他們想要像科幻小說一般，應用可程式化材料真正改變一個固態物體。構想很簡單：創造一個像細小沙粒般的電腦晶片。這些聰明的小沙粒允許你改變表面的靜電電荷，使得它們可以互相吸引或排斥。使用一組電荷，這些顆粒可以並排形成某種排列。但你能重新安排這些顆粒，使它們的電荷改變。突然間，這些顆粒自行重新排列，形成截然不同的安排。這些顆粒被稱為「電子黏土原子」（claytronic atoms,catoms）因為它們很像原子，只要改變電荷，就能形成很多不同的樣式。（可程式化材料與我們在第二章提及的分子機器人有很多共通點。分子機器人包含許多可以自行組合、約兩吋大小的智慧方塊，而可程式化材料則將這些方塊縮小到次公釐的大小。）

英特爾的研究員賈森‧坎貝爾（Jason Campbell）是此一科技的倡議者之一。他說：「設想一個機動裝置。我的手機太大，塞入口袋有困難，按鍵對我的手又太小。當我想看電影或寫電子郵件時更是不方便。但是如果我有二百至三百公釐的電子黏土，我會用它來扮演此刻我所需要的裝置之外型。」所以，在某一時刻，我有手機在手；在下一時刻，它變形為其他樣式。就這樣，我不需要攜帶太多的電子器具。

英特爾的實驗室，已經創造出一種大約一吋大小的電子黏土排列。這個電子黏土像是一個方塊，每一面都有數十個細小電極均勻分布。此一電子黏土的獨特性在於，你可以改變它的每一個電極的電荷，使得電子黏土能以不同的方向，向對方彎曲。用某一組電荷，這些方塊可以互相連結，創造出大的方塊。改變每一個方塊上電極的電荷，則電子黏土解體後迅速重組成完全不同的形狀，例如一艘船。

關鍵點在於將每一個電子黏土縮小為一粒沙或更小。如果有一天，矽蝕刻科技允許我們製造出細胞一般小的電子黏土，那麼我們就能夠真正做到，只要按一次按鈕，就能將外型改變。英特爾的高級研究員賈斯汀‧

拉特納（Justin Rattner）說：「未來四十年內，這將成為日常使用科技。」汽車設計師、飛機工程師、藝術家、建築師、以及任何必須設計立體模型的人，會立即將它們派上用場，然後不斷修正它們。例如，我們有一個四門轎車模型，我們可以拿起模型，拉一拉，它就變成了斜背式汽車。將模型稍一壓緊，又變成了跑車。這遠比模型黏土優越，因為一般黏土沒有記憶或智能。可程式化材料有智能，可以記憶以前的形狀，跟隨新的構想調整，也隨著設計師的願望做反應。一旦模型完成，設計的樣式能立即以電子郵件傳送至千萬個其他設計師，他們也可以製造出完全相同的複製品。

這將對消費產品產生深遠的影響。例如，玩具可以植入新的軟體指令，以程式改變外型。所以到了聖誕節，我們只需下載新玩具的軟體，將舊玩具重新程式化，於是全新的玩具就會出現。兒童不再打開聖誕樹下的禮物，而是下載聖誕老人以電子郵件送來他們喜歡的玩具軟體，來過聖誕節。而市場上最熱門的物品，就是可以作成各種玩具的電子黏土。這意味著，有很大部分的消費者產品，最終會簡化成透過電子郵件傳送的軟體程式。你不再雇用卡車來運送傢具和電器，而只要從網路下載軟體來讓舊產品再生。有了可程式化材料，重新裝修房屋和公寓將不再繁雜。在你的廚房中，若要更換瓷磚、桌面、電器和櫥櫃，都只要按一下按鈕。

此外，這也能減少垃圾。如果東西能夠重新程式化，你就不需丟棄許多不想要的東西。如果某一電器或傢具的一部分壞了，你只要將它重新程式化，它就變成新的了。

雖說看來好處多多，但是英特爾的團隊也要面對許多難題。其一是如何協調這數百萬個電子黏土的運動。當我們試圖上傳所有的資訊進入可程式化材料時，將會有頻寬的問題。但我們也有捷徑可走。

例如，在科幻電影中，常會看到「變形」（morphing），也就是一個人突然就變成怪獸。這在從前，要在影片中表現出這種效果，是個很複雜、冗長乏味的過程，但現在可以很快就用電腦達成。首先，你找出人類和怪獸臉上不同關鍵點（如鼻子和眼睛）的一些向量，每個向量每移動一次，臉部就逐漸改變。然後電腦以程式去將這些向量由一張臉移向另一張，因而慢慢地將一張臉變成另一張。用同樣的方式，在改變立體物件外型時，有可能使用捷徑。

另一個問題是：電子黏土之間的靜電力，相較於將固體維持在一起的原子間作用力，顯得微弱。而我們已經知道，顯示金屬的堅硬性質和塑膠彈性的量子力可能非常強大。未來，若要同時複製這些量子力和靜電力，以確使這些產品維持穩定，將是一大課題。

當我帶領「科學頻道」攝製團隊，訪問卡內基梅隆大學的塞思·戈爾茨坦（Seth Goldstein）時，我曾有機會目睹可程式化材料令人印象深刻而又快速的進展。在他的實驗室內，你可以在一個桌子上看到大大小小的立方體（每個都含有晶片），一疊一疊地分散堆放著。我看到兩個這種立方體以電子力緊緊地結合在一起，而他要我試試能否將它們掰開。意外的是，我竟辦不到。我發現連結兩個立方體的電子力非常強大。然後他指出，如果將這些立方體微型化，它們的對應電子力將更加強大。他帶我到另外一個實驗室，讓我看到這些電子黏土可以變得多麼小。他應用一種相同於在矽晶圓上蝕刻出數百萬電晶體的科技，可以刻出顯微鏡下才能看得清楚、僅有數公釐寬的電子黏土。他的最終目標是希望，透過控制它們的電子力，只按一次按鈕就能讓它們組合成任何形狀——簡直就像魔術師變出任何他想要的東西一般。

然後我問他，你要怎樣對無數的電子黏土發出詳細指令，才能將諸如電冰箱等物體，突然變成一個烤箱？我說，那看來像是一個寫程式的夢魘。但他回答說，並無必要對每一個電子黏土發出指令。每一個電子黏土只要知道它要附著的鄰居就行。如果每一個電子黏土被指示和一小組的鄰近電子黏土相連，那麼電子黏土就會奇蹟似地自行重組，成為複雜的結構（很像嬰兒的神經元，在大腦發展時，只需知道如何與鄰近的神經元互相附著）。

假定程式編寫和穩定的問題能夠解決，那麼到了世紀末期，整棟建築甚至城市，可能在一個按鍵之下就能矗立起來。我們要做的只是安排出建築的位置，挖出它的地基，然後允許無數電子黏土，在沙漠或叢林中創造出整座城市。

不過，這些英特爾工程師想像有一天，電子黏土甚至可能會變出人形。塞思說：「為什麼不行？進一步大膽揣測是很有趣的事。」（果真如此，那麼就會真的有T-1000機器人了。）

遙遠未來（二○七○─二一○○）

在奈米科技鼓吹者想像中，到了二一○○年，還會有更強有力的機器出現：可以創造任何物體的分子組合器或「複製機」。它將包含一個約有洗衣機大小的機器。你會把基本的未加工材料放進機器，然後按一個按鍵。無數個奈米機器人會聚集在這些未加工材料上，每一個都會按照程式指示，將這些材料的分子逐一拆解，然後將它們重組成全新的產品。這個機器將能製造任何物體。這個複製機將是工程與科學的冠冕性成就——自從我們在史前時代撿起第一個工具以來，我們奮鬥過程的最高峰頂。

這個複製機的問題之一，在於為了複製物體而需要重組原子的龐大數量。例如，人體就有五十兆個細胞，和超過10^{26}的原子。這是一個巨大的數字，僅僅儲存所有的原子的位置，就需要極龐大的記憶空間。

但有一個可以克服問題的辦法，就是創造出奈米機器人（nanobot）——一個仍然只是假設性的分子機器人。這些奈米機器人有幾個關鍵性的特性。第一，它們可以自行複製。如果它們可以複製一個，那麼理論上就可以複製無數個自己。所以，關鍵戲法就在創造第一個奈米機器人。第二，它們有能力指認分子，並在精確位置切開它們。第三，依循一個主要程式碼，它們有能力將這些原子重組成不同的物體。所以，重新安排10^{26}的原子的大量工作，已被簡化為製造同樣數量的奈米機器人，每一個都被設計來操個別的原子。如此一來，身體的巨大數量原子不再是令人卻步的障礙。真正的問題只在於創造出第一個這種神祕奈米機器人，讓它們自行複製。

不過，科學界對於奈米編織器（nanofabricator）的完美夢想，是否存在物理的可能性，看法分歧。有少數人，例如奈米科技先鋒，也是《創造的引擎》（The Engines of Creation）的作者埃里克‧德萊思勒（Eric Drexler），就發想出一個未來，所有的物體都在分子層次製造，創造出我們現在只能想像的豐饒物品，透過創造出「可以創造出任何你想要的東西」的機器，社會的每一方面都會發生大翻轉。不過，其他的科學家則對此抱持存疑。

例如，去世不久的諾貝爾獎得主理查德‧斯莫利就在二○○一年於《科學美國人》（Scientific American）提出「黏手指」（sticky fingers）和

「胖手指」（fat fingers）的問題。關鍵的問題是：足夠靈巧、可以依照意願重組分子的分子奈米機器人，可能被製造出來嗎？他說，答案是：不能。

當斯莫利與德萊思勒在一系列信件中針鋒相對時，辯論蔓延開來。那些信於二○○三至二○○四的《化學與工程新聞》（Chemical and Engineering News）重新刊出。辯論的迴響持續至今。斯莫利的立場是，分子機器的「手指」無法勝任這個精密的任務有兩個理由。

第一，「手指」將要面對細微的吸引力，使它們與不同分子黏在一起。有一部分力量來自原子會因存在於電子之間的極小的電子力（例如范德華作用）黏在一起。想像你在修理手錶時，小鉗子覆蓋著蜂蜜。要組合任何像手錶零件那麼細緻的任何東西將是不可能的事。現在再想像你要組合的是比手錶更加複雜的東西（例如分子），而它會持續地黏在你的手指上。

第二，這些「手指」可能因為太「胖」而無法操作原子。想像你戴著厚厚的棉手套去修理手錶。由於這些「手指」與被操作的物體，同樣都是由一些單一原子做成，手指可能因為太粗而無法執行所需的精緻運作。

斯莫利下結論說：「就如同你無法僅僅將一個男生和一個女生送作堆，就要他們產生愛情，你也無法以簡單的機械性移動，就要兩個分子之間產生精確的化學變化……化學，如同愛情，遠比機械性的移動更加微妙。」

這個辯論進入了真正的核心：是人類社會終將迎接複製機產生社會大變革的一天？還是只會發展出被視為是好奇心作祟然後被拋進垃圾桶的科技。如同我們討論過的，我們的世界的物理法則，要轉換成奈米世界的物理並不容易。我們平常可以忽略的物理作用，諸如范德華作用、表面張力、不確定性原理、保利不相容原理等等，卻支配著奈米世界。

要體會這個問題，可以想像原子有彈珠大小，而你有一個裝滿這些彈珠的游泳池。如果你掉進這個游泳池，結果將會與掉進真正裝水的游泳池完全不同。這些「彈珠」將會不斷地振動，並且由於布朗運動（Brownian motion），從不同的方向碰撞你。想要在這個游泳池裡游泳將是不可能的事，因為那將會像游在糖漿中一樣。每次你試圖抓住一個彈珠時，由於作用力的複雜混合，它們不是從你手上溜走就是黏在手

上。

最後，雙方的科學家同意，可有不同意見存在。雖然斯莫利無法對分子複製機揮出擊倒性的一拳，但在塵埃落定之後，有幾件事變得明朗。第一，雙方同意，原來的有附帶鉗子、可以切割和連結分子的奈米機器人的素樸概念必須修正。在原子的層次上，支配的力量由量子力取代。

第二，雖然今天這個複製機（或萬能編織機）仍然只是科幻小說題材，但它已有一個版本存在。例如，大自然可以納入漢堡和蔬菜，而在九個月內轉化成嬰兒。這個過程是由DNA分子（其中有嬰兒藍圖的編碼）執行，它指揮核糖酸小體（ribosomes，它能將分子剪接成正確次序）使用出現在食物中的蛋白質和氨基酸的活動。

第三，分子組合器可能會成功，但是要以較為複雜的版本出現。例如，就像斯莫利所指出的，把兩個原子聚集在一起，並不表示會有反應。大自然往往引用第三者（一種溶於水的酵素）來促成反應，以繞過這個問題。斯莫利指出，許多電腦和電子工業的化學物質無法溶於水。但德萊思勒反駁說，並非所有的化學反應都涉及水或酵素。

例如，有一種所謂「自我組合」或「由下向上」方式的可能性。自古以來，人類已經應用「由上向下」方式於建築。用槌子和鋸子等工具，人們開始砍伐樹木，然後按照一個既定計畫，將木片鋸合成房屋等較大建築。人們必須從上面就開始小心指引建造過程的每一步驟。

在「由下向上」的方式中，東西自行組合。例如，在大自然中，美麗的雪花在暴風雪中自行結晶。無數的原子重組，形成了新穎的形式。不需要任何人去設計每一片雪花。這種現象在生物系統中也常發生。細菌的核糖酸小體（一種含有至少五十五種不同的蛋白質分子和數種RNA分子複合的分子系統），可以在一個試管中同時自行組合。

自行組合也被應用於半導體工業。電晶體中的成分，有時自行組合。依據精確次序應用不同的複雜技術和過程，如，冷卻、結晶、聚合作用、蒸汽沉澱、凝結等等，我們可以製成各式各樣具有商業價值的電腦零件。如同前已提及，某些類型的應用於對抗癌症的奈米粒子，可以用這個方法製造出來。

不過，多數物體不能自行創造。一般而言，只有很小部分的奈米材料曾

經顯示自行組合的性質。你無法命令奈米機器像從菜單點菜般，進行自行組合。所以，以這種方式創造奈米機器的進展，將會是穩定而又緩慢。

總之，分子組合器顯然並未抵觸任何物理法則，但將會超乎尋常地難以製造。現在並無奈米機器人存在，最近的將來也不會有，但是一旦（也是如果）第一個奈米機器人成功地造出來，它將如我們預期地改變社會。

建造複製機

複製機的外觀將會像什麼樣子？無人確實知道，因為還要再過數十年、甚至一世紀才能製造出來。但當我的頭被檢驗時，我已經稍稍領會到複製機會長成什麼樣子。為了製作「科學頻道」的一個特別節目，他們以雷射光對我的臉部做水平掃描，然後以塑膠製造出一個真實且立體的臉。當光線在我的皮膚上反彈時，反射光被感應器記錄下來，然後將影像儲存於電腦中。然後光線又再度通過我的臉，但略微降低。最後它完成對我的臉的掃描，將我的臉分割成許多水平切片。往電腦螢幕看去，可以看到一個由這些水平切片構成我的臉的表面立體圖像（精密度可能達到十分之一公釐）。

然後這些資訊又被存入一個大的儀器（約一個冰箱大小）——它能創造出幾乎任何物體的形象。這個儀器有一個可以水平移動的小小管嘴，可以來回移動通過許多次。每移動一次，它就噴出小量軟化的塑膠，複製出我的臉的原始雷射影像。大約經過十分鐘和無數次的移動通過，模型在機器中浮現，其中有一個我的臉的怪異相貌。

此一科技的商業應用無可限量，因為你可以在短短數分鐘內，創造出任何立體物件的真實副本，例如複雜的機器零件。不過，我們還可進一步想像一個儀器（數十至一百年內），可以創造出真實物體的複製品，精確度降至細胞和原子層次。

在下一層次，有可能應用這種立體掃描器來創造人體的活器官。在維克森林大學，科學家領先嘗試一種以噴墨印表機，創造出活的心臟組織的新方法。首先，他們必須小心地寫出軟體程式，可以在每次管嘴經過時，依次噴出活的心臟細胞。在執行時，他們使用一個普通的印表機，

但它的墨水匣中裝的是一種含有活心臟細胞的混合液。如此，他們可以控制每一個細胞的立體分布。經過多次移動通過，他可以真正創造出心臟組織的分層。

還有一種工具，可能有一天會記錄我們身體每一個原子的位置：磁振造影機。如同我們之前已觀察到，磁振造影掃描的精密度大約十分之一公釐。這意味著一個敏感的磁振造影機的每一像素可能含有數千細胞。但如果你檢查磁振造影機背後的物理學，你會發現影像的正確性與機器內部磁場的一致性相關。因而，只要提高磁場的一致性，我們可能將精密度降至低於十分之一公釐。

現在已有科學家想要造出，解析度降至細胞大小（甚至更小）的磁振造影機類型的機器，小至個別分子和原子都可掃描。

總之，複製機並不違反物理法則，但很難用自行組合的方式辦到。到世紀晚期，當自行組合的科技終於成熟以後，我們就可以考慮複製機的商業應用。

灰色黏質？

包括昇陽電腦（Sun Microsystems）創辦人之一比爾·喬伊（Bill Joy）在內的一些人，已經表達過對奈米科技的保留看法，他們的文章中說，此一科技遲早都會失控，吃光地球上所有礦產，吐出無用的「灰色黏質」（Gray Goo）。連英國的查爾斯王子（Prince Charles）也曾發言反對奈米科技和灰色黏質的前景。

危險就在這些奈米機器人的關鍵特性：它們能夠複製自己。如同病毒，一旦他們被釋放到環境中，就無法收回。最終，它們可能失控地繁殖，接管整個環境，並毀滅地球。

我的信念是：在這種科技足夠成熟，可以創造出複製機以前，我們還有數十年，甚至數百年的時間，所以有關灰色黏質的關切言之過早。未來數十年間，我們將有足夠的時間設計出保護機制，以對付失控的奈米機器人。例如，我們可以設計一個自動防止危害的系統，只要按下一個恐慌按鈕，所有的奈米機器人立刻失效。或者，可以設計出專門搜尋並摧毀失控奈米機器人的「機器人殺手」。

另一種處理的方法是去研究大自然，它對這個問題有好幾億年的經驗。我們的世界充滿著可以自我複製的分子生命形式（稱為病毒和細菌），會因大量增值而失控，也會產生突變。我們的身體也會創造自己的「奈米機器人」，也就是免疫系統中的抗體和白血球，它們會搜尋並摧毀外來的生命形式。這個系統當然不完美，但它提供一個可以處理奈米機器人失控問題的模式。

複製機的社會影響

在我曾主持的BBC及Discovery頻道合作的科學節目中，《激進的進化》（Radical Evolution）一書的作者喬爾‧高勞（Joel Garreau）說：「自我組合機器如果成真，那將是歷史上最大的失控時刻。然後世界會產生難以想像的演變。」

有一個古老的諺語：小心你的願望，因為它可能成真。奈米科技的聖杯是創造分子組合器（或複製機），但一旦被發明，它將徹底推翻所有的社會基礎。所有的哲學和社會制度最終都植基於匱乏和貧困。在整個人類歷史中，這點都是支配性主題，貫穿社會，形成文化、哲學和宗教。在某些宗教中，繁華是神聖的獎賞，而匱乏則是懲罰。相對地，佛家則植基於普遍的痛苦本性，以及如何處理它。在基督教中，新約說：「讓駱駝穿針，遠比讓富人進入神的王國更加容易。」

財富的分配也界定了社會本身。封建制度建立在保存少數貴族階級的財富，而以農奴的貧困為代價。資本主義建立在勤奮而有生產力的人，透過創業獲得工作報酬，變得富有。但如果懶惰而無生產力的個人，可以只要一次按鈕，就能幾乎免費得到想要的，那麼資本主義就會失效。複製機將打亂原有的秩序，將人際關係翻轉。「擁有者」和「匱乏者」之間的分野將會消失，隨之而去的還有身分地位與政治權力。

這個難題在《星艦迷航記：下一代》曾有探討。其中，有一個來自二十世紀、漂浮於外太空的容器被發現。容器裡面裝著一些冷凍的人體——他們罹患原始時代的不治之症，希望未來能夠恢復生機。企業號星艦上的醫師很快地治好每一個人的病，並且讓他們復活。這些幸運的個人很驚訝他們居然賭對了，但是其中有一個人是精明的資本主義者。他問的第一個問題是：這是什麼時期？當他發現他活在二十四世紀時，他很快

地知道他的投資到了今天是一筆大財富。他立刻要求與地球上他的銀行家聯繫。但是企業號的船員都感到困惑。金錢？投資？這些在未來都不存在。在二十四世紀，你只要想要某種東西，你就會得到。

這又喚起了追尋完美社會（或烏托邦）的問題。烏托邦一詞來自湯瑪斯‧摩爾爵士（Sir Thomas More）一五一六年所寫的小說《烏托邦》（Utopia）。由於憎惡周遭所見的痛苦和齷齪，他想像出在大西洋中的一個虛構的島嶼中的極樂世界。在十九世紀，歐洲有許多社會運動，尋求著不同形式的烏托邦，其中有許多人最後逃到美國，即使在今日，我們仍能在那裡看到他們定居的蹤跡。

一方面，複製機可以給我們十九世紀的夢想家想要的烏托邦。過去烏托邦的實驗因為匱乏導致不平等，因而有了爭吵，最終就瓦解了。但如果複製機解決了匱乏的問題，也許烏托邦就可企及。藝術、音樂和詩歌將會興盛起來，人們將會自由自在地追求最喜愛的夢想和願望。

另一方面，少了匱乏和金錢的動機因素，將會導致自我耽溺、退化的社會，因而向下沉淪。只有少數有最大藝術動機的人，會努力去寫詩歌。批評家說，其餘都將成為遊手好閒的人。

連烏托邦的信徒所用的定義，也帶來疑問。例如，社會主義者的真言是：「各盡所能，各取所獻。」而共產黨的真言則是：「各盡所能，各取所需。」

但如果複製機有可能，那麼真言只會變成：「所有慾望，皆予滿足。」

不過，也有審視這個問題的第三種方式。依據「洞穴人原則」，在過去十萬年，基本的人性未有很大改變。當年並無所謂工作。人類學家說，原始社會大部分共有，平等分享物資和苦工。日常生活韻律不受工作和待遇控制，因為這兩者並不存在。

但當時的人未成為遊手好閒的人，有數點理由。第一，他們會餓死。不分擔工作的人只會被丟到部落外，他們很快就會被消滅。第二，人們會對工作感到驕傲，甚至在任務中發現意義。第三，有巨大的社會壓力的個體在支持社會上有生產力的成員。有生產力的個體可以結婚，將他們的基因傳到下一代，而不事生產的人的基因通常跟著他們死亡。

所以，為什麼在複製機發明以後，每個人都可以要什麼有什麼，人們還要過有生產力的生活？首先，複製機將會保證沒有人挨餓。但第二，多數人可能會繼續工作，因為他們對自己的技能感到驕傲，也在工作中發現意義。而第三個理由（社會壓力）因為沒有違反個人自由，較難維持。為了取代社會壓力，教育可能要重大調整，來改變人們對工作和報酬的態度，以免複製機被濫用。

幸而，因為進展會很緩慢，而複製機還要一世紀左右才會出現，社會將有足夠的時間去辯論這個科技的優缺點，並對這個新的現實調適，以免社會解體。

第一個複製機將極有可能非常昂貴。如同麻省理工學院機器人專家羅得尼˙布魯克斯（Rodney Brooks）所說：「奈米科技會興盛起來，如同照相平板印刷的興盛，是在很昂貴、特殊控制的情況下，而不是在自力支撐的大眾市場科技。」無限免費物品的問題不大。考慮到這些機器的複雜性，在第一個機器創造出來以後，可能還需要好幾十年才能把成本降低。

我曾與賈邁斯˙卡斯西歐（Jamais Cascio）有過一次有趣的對話。他是一個頂尖的未來學家，有很長的生涯都在思索未來的藍圖。他首先告訴我，他懷疑奇點理論（可參考第二章）。他觀察到，人類的本性和社會動態過於混亂、複雜而且不可預期，所以不能塞進一個簡單整齊的理論。但他也承認，奈米科技令人印象深刻的進展，最終將會創造一個豐饒的社會，特別是有了複製機和機器人以後。所以，我問他，當物品幾乎免費時，社會富裕、人們不須工作時，社會將有何變化？

他說，會發生兩件事。第一，會有足夠的財富來保證，每一個人即使不工作，都得到有尊嚴的最低收入。所以總人口中可能會有少部分的人終生偷懶無所事事。他預見會有永久的社會安全網。這也許非我們所欲，但卻無可避免，特別是如果複製機和機器人能符合我們的物質需求時。第二，他認為，這點會由於企業精神的革命性進展而獲得補償。在免於陷入貧窮和毀壞的恐懼以後，比較有生產力的個人，將會更有創造性，能面對更多危機，去創造出新的工業，並提供新機會給別人。他預見到，當創造精神由破產的恐懼解放後，會有一個社會的文化復興。

在我的領域（物理學）中，我知道我們多數人進入這一行，並不是為了

金錢，而是為了發現和發明的純粹快樂。我們往往會為了追求一個夢想（而非金錢），放棄其他領域待遇優渥的工作。我所認識的藝術家和知識分子，也有相同的感受——他們的目標並不是儘量將銀行存款增加至最大，而是創造，並使人類精神高貴。

我個人認為，如果到了二一○○年，社會變得富有，我們被物質財富包圍，我想我們的社會將以同樣方式反應。少數人將會形成永久性不工作的階級。其他人將會從貧窮的限制中解放，追求創造性的科學和藝術成就。對他們來說，成為有創造性、原創性和藝術性將會重於物質性的吸引。但多數人會繼續工作，而工作也很有用，只因為那是我們的遺傳基因的一部分——我們內在的洞穴人原則。

但是，還由一個連複製機也無法解決的問題。那就是能源的問題。所有這些分子科技，需要大量的能源來驅動。這些能源從何而來？

第五章　能源的未來——來自眾星的能源

石器時代並未以缺乏石頭結束。而石油的時代，則會在世界油源枯竭以前結束。

——詹姆斯‧坎頓（James Caton）

在我心中，融合的重要性等同於史前迷霧中，如原始火苗般的原創禮物。

——本‧波瓦（Ben Bova）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

太陽能和氫經濟／風力發電／太陽來了／電動車／核子分裂／核子擴散

世紀中期（二○三○—二○七○）

全球暖化／二氧化碳——溫室瓦斯／訪問冰島／水淹孟加拉和越南／技術性修補／融合發電／熱融合／國家點燃設施——以雷射融合／國際熱核實驗反應爐——磁場內的融合／桌上型融合

遙遠未來（二○七○—二一○○）

磁力的時代／磁力汽車和火車

磁浮火車和汽車／來自太空的能量

眾星是神的能量來源。當阿波羅在由噴火馬拖動的馬車中奔馳過天空時，他以太陽無限的力量照亮了天堂與地面。他的力量只有宙斯本身可以匹敵。曾有一次，宙斯諸多凡間愛人之一的塞墨勒（Semele）請求他

現出真面目時，他不情願地照做。結果爆發了使人目盲的宇宙能量，把她燒成脆片。

在本世紀，我們將要駕馭眾星的力量——眾神能量之源。短期言之，這意味著導入太陽（或氫）的時代取代石油時代。但長期言之，它意味著駕馭融合的力量，甚至來自外太空的太陽能。物理學的進一步進展，可以引進磁力的時代，使得汽車、火車甚至滑板都將以磁力為墊，懸浮於空中。我們的能源消耗可以急遽減少，因為幾乎所有汽車和火車所用的能量，只是用來克服道路上的摩擦。

石油的結束？

今天，我們的地球徹底仰賴以石油、天然氣和煤炭等形式出現的化石燃料。全部加起來，世界消耗十四億兆瓦特的電力，其中百分之三十三來自石油，百分之二十五來自煤炭，百分之二十來自天然氣，百分之七來自核能，百分之十五來自生質能源和水力，只有微不足道的百分之○‧五來自太陽能和再生能源。

若無化石燃料，世界經濟將陷入無止境的停頓。

有一個人，清楚地看到石油時代的結束，他就是殼牌石油公司工程師金恩‧哈伯特（M.King Hubbert）。一九五六年哈伯特對全美石油協會發表演講，發表令人不安的預言，當時招致同行一面倒的嘲笑。他預測，美國的石油儲藏量將會快速降低，由地下抽取的石油將很快超過百分之五十，觸發一個無法逆轉的下降時代，時間將設定於一九六五年至一九七一年。他看到，美國的石油總量可以用鐘形曲線標示，而我們那時已經接近曲線的最高點。他預測，從此以後，事情只會向下發展。這意指石油將越來越難抽取，因而難以想像的事情將會發生：美國會開始進口石油。

他的預言似乎顯得輕率、甚至不尋常和不負責任，因為那時美國仍然從德州及國內其他地方抽取大量石油。但現在石油工程師不再嘲笑了。哈伯特的預言相當精準。到了一九七○年，美國的石油產量達到每日一千零二十萬桶的高峰，然後開始下降。從此未曾回復。今天，美國的石油有百分之五十九仰賴進口。事實上，如果你拿哈伯特數十年前的預估圖表，與美國直到二○○五年的實際石油產量圖做比較，兩個曲線幾乎相

同。

現在，石油工程師面對的根本問題是：我們的世界石油儲存量已經到達哈伯特的頂點了嗎？回到一九五六年，哈伯特也預測，全球石油產量將在大約五十年內達到高峰。他可能又對了。當我們的子女回顧這個時代，他們將會如同我們今天看待鯨魚油一般看待化石燃料，把它當成遙遠過去的不幸遺物嗎？

我曾在沙烏地阿拉伯和整個中東地區做過許多次演講，談及科學、能源和未來。一方面，沙烏地阿拉伯有二千六百七十億桶石油，所以這個國家好像是浮在巨大的地下石油湖之上。走遍沙烏地阿拉伯和波斯灣國家，能源的浪費隨處可見，有巨大的噴泉從沙漠中噴出，也創造出巨大的人工池塘和湖泊。在杜拜，甚至有室內的滑雪斜坡，上面鋪著好幾千噸的人造雪，表達對室外令人流汗的熱度的蔑視。

但是現在他們的石油部長開始擔憂了。所有「已證實石油儲藏量」的相關修辭，本應當是用來向我們保證未來數十年油源無虞，但我們認識到，這些權威的石油數字中，有許多是虛構騙人的。「已證實石油儲藏量」彷彿夠權威、很確定而令人寬心，但你遲早會知道，儲藏量往往只是地區石油部長的主觀願望和政治壓力的產物。

通過與能源專家交談，我可以看到一個粗略的共識正在浮現：我們的世界石油產量，若不是正在哈伯特高峰，就是離開那個致命性關鍵點大約十年。這意味著在不久的將來，我們將進入無法逆轉的下降時期。

當然，我們永遠不會把石油用完。新的儲油區經常發現，但開採和提煉的成本將會大幅攀升。例如，加拿大有大量的焦油砂岩儲存，足以提供世界數十年的需求，但開採和提煉並不符合經濟效益。美國可能也有足夠的煤礦蘊藏可以支持至少三百年，但是還有法律限制，而且採掘所有的顆粒和氣體污染物的代價也很巨大。

還有，石油繼續在政治不安定的地區被發現，也影響了其他國家的安定。油價在過去數十年來若以圖形呈現，就像搭乘雲霄飛車，二○○八年每桶最高達一百四十美元（在加油站則每加侖售價四美元以上），然後因經濟大蕭條而下降。雖然由於政治不安、投機、謠言等因素而有劇烈升降，但有一點很清楚：長期而言，平均油價將會持續上升。

這對世界經濟有重大的暗示。二十世紀快速上升的現代文明，是由兩件事所推動：廉價的石油和摩爾定律。油價的上升，對世界食物的供應和污染的控制增加了壓力。如同小說家傑瑞·普耐爾（Jerry Pournelle）說過：「食物和污染不是主要問題：它們是能源問題。只要有足夠的能源，我們就能依據需要，透過高密度的方式（如水耕法和溫室），製造我們想要的數量的食物。污染也類似：提供足夠能源，污染物就能轉化成可管理的產品；如果需要，就將它們分解回到他們組成產品以前的成分。」

我們也要面對另一議題：中國和印度中產階級的崛起。這是戰後人口改變最大的地區之一，它對石油和消費品的價格產生巨大的壓力。在好萊塢電影中看到麥當勞的漢堡和雙車庫，他們也要擁有浪費能源的美國夢。

世紀初期（現在—二○三○）

太陽能／氫經濟

在這方面，歷史似乎一再重演。回到一九○○年代，福特（Henry Ford）和愛迪生兩個終生好友打了一個賭，要看未來的主要能源是那一種形式。福特賭的是油替代煤炭，內燃機將會取代蒸汽機。而愛迪生賭的是電車。這是一種決定命運的打賭，它的結果會對世界歷史產生重大的影響。有一段時間，看來愛迪生將會賭贏，因為鯨魚油很難取得。但在中東及其他地區廉價油源的迅速發現，很快地讓福特的勝利浮現。從此世界大不同。電池無法與石油的驚人成功相提並論。（即使在今日，以同等重量做比較，石油產生的能量仍然大過電池約四十倍。）

但現在潮流慢慢地在改變了。在打賭一個世紀以後，愛迪生可能會贏回來。

在政府和企業的廳堂，大家在問的是：什麼東西能取代石油？目前沒有確定的答案。在近期內，並無立即的石油替代物，比較可能的是多重能源的混合，而無單一能源居於支配地位。

但是最有希望的繼任者是太陽能／氫的力量（基於可更新的科技，如太陽能、風力發電、水力發電和氫）。

目前，由太陽能電池產生的電力成本，比由煤炭發電的價格高了數倍。但是因為科技的穩定推進，太陽能／氫的成本持續下降，而化石燃料的成本則緩緩上升。據估計，大約在十至十五年內，兩條曲線將會交叉。其餘就要交給市場去完成。

風力發電

在短期內，可再生電源如風力發電是大贏家。全世界由風力產生電力的容量，由二○○○年的一百七十億瓦，上升到二○○八年的一千二百一十億瓦。風力發電，一度被認為是次要角色，現在日益重要。最新的風力渦輪發電機科技提升了風力發電廠的效能和生產力。風力發電已經成為能源市場中成長最快的部門。

今日的風力渦輪發電機，已不可與十八世紀晚期推動農場和磨坊的老式風車同日而語。一個沒污染又安全的風力發電機，可以產生五百萬瓦電力，足以供應一個小村莊。風力渦輪發電機的葉輪光滑雄偉，葉片長達一百呎，可以在幾乎沒有摩擦的狀態下旋轉。它產生電力的方法與水力發電及自行車電力產生器相同。葉片的轉動推動線圈內的磁鐵旋轉。旋轉的磁場推動線圈內的電子，創造出純粹電流。一個大的風力發電廠，含有一百個風車，可以發電五億瓦，相對地，一個燃煤或核能發電廠發電量是十億瓦。

過去數十年，歐洲是風力發電科技的領先者。但最近，美國的風力發電量，已經超過歐洲。在二○○九年，美國風力發電量為二百八十億瓦，但光是德州風力發電就產出八十億瓦，而且還有十億瓦容量正在建造中，另有更多正在籌劃中。如果一切計畫順利，德州將有風力發電量五百億瓦，超過該州二千四百萬人民的需求。

中國的風力發電將會很快地超過美國。它的「風力基地」（Wind Base）計畫將會創造六個風力發電廠，總發電容量高達一千二百七十億瓦。

雖然風力發電看來吸引力日漸增加，未來也一定會繼續成長，但它無法成為供應世界電力的主體。在最佳狀態下，它將是較大能源整合體中的重要部分。風力發電面臨一些問題。它只能在有風的時候間歇產出，也只能在世界上少數關鍵地區設置。還有，由於電力傳輸的損失，風力發

電廠必須接近城市，這也進一步限制了它們的效用。

太陽來了

追根究底，所有的能源都來自太陽。從某種角度來說，連石油和煤炭，也都是聚集的日光，代表著數百萬年前落在植物和動物身上的能量。結果，儲存於一加侖石油聚集的陽光能，大於我們所能存於一個電池的能量。這是上個世紀愛迪生所面對的基本問題，直到今日同樣的問題仍然存在。

太陽能電池的運作，是將陽光直接轉換成電力。這個過程，愛迪生曾於一九○五年加以解釋。當光的粒子，或稱光子（photon），碰到金屬時，它踢走一個電子，因而產生電力。

不過，太陽能電池效率不足。即使工程師和科學家經過數十年辛勤工作，它的效能仍然徘徊在百分之十五上下。所以研究朝著兩個方向進行。第一是增進太陽能電池的效能，這點仍然是很難的技術問題。另一個研究方向是降低太陽能園區製造、安裝、建築的成本。

例如，我們可以將整個亞利桑那州鋪上太陽能電池，就可能供應全美國的電力需求，但那不切實際。不過，撒哈拉大沙漠的土地所有權卻突然變得很熱門，投資家已經在這個沙漠建造大型太陽能園區，以滿足歐洲消費者的需要。

或者在城市中，我們可以在家屋和建築上面鋪設太陽能電池，以降低成本。這樣做有一些優點，包括消除從中央發電廠輸送電力過程所產生的電力損失。這只是降低成本的問題之一。初步估算顯示，這些投資如果要產生利益，尚須精打細算，儘可能省下每一塊錢。

雖然太陽能發電上無法符合期待，最近的油價不穩定卻產生刺激效果，使太陽能發電進入市場。潮流可能轉變。每幾個月就有紀錄被突破。太陽能電流的產出每年成長百分之四十五，幾乎是每兩年就倍增。全世界光伏發電（photovoltaic）裝置現在已有一百五十億瓦，僅僅二○○八年，就增加了五十六億瓦。

二○○八年，佛羅里達光電公司宣布全美最大的太陽能工廠建造計畫。

合約由太陽能公司（SunPower）取得，計畫生產二千五百萬瓦電力——現有美國最高紀錄是在內華達的內利（Nellis）空軍基地，其太陽能發電廠生產一千五百萬瓦電力。

二○○九年，大本營在加州奧克蘭的亮源能源公司（BrightSource Energy）宣布，計畫超越那個紀錄，於加州、內華達和亞利桑那三州，建造十四座太陽能工廠，生產二十六億瓦電力。

亮源能源的計畫之一是伊凡帕（Ivanpah）太陽能發電廠，在南加州含有三個太陽能熱電廠，將產生四億四千萬瓦電力。另一個與大西洋瓦斯及電力公司的合作計畫，則將於莫哈威沙漠興建產能達十三億瓦的工廠。

二○○九年，世界最大的太陽能電池製造者第一太陽能公司（First Solar）宣布，它將在中國的長城以北不遠的地方，興建世界最大的太陽能工廠。這個十年合約（細節尚未敲定），打算興建一個包含二千七百萬薄膜太陽能版的複合太陽能電廠，將發電二十億瓦，或相當於兩座燃煤火力發電廠，足以供應三百萬家庭用電。這個覆蓋二十五平方英里的工廠，將興建於內蒙古，事實上也是一個更大的能源園區的一部分。中國官員說，太陽能只是此一設施的一部分，園區最終將包括來自風力、太陽能、生質能源及水力發電等，供應一百二十億瓦電力。

這些深具雄心的計畫，最後是否會在環保審查與超出成本的兩面夾攻下而妥協，尚未明朗。但重點是，太陽能經濟已經逐漸發生巨變，大的太陽能公司認真地將太陽能電力視為化石燃料的競爭者。

電動車

由於全世界的石油有一半使用在汽車、卡車、火車以及飛機上，人們對這一部門的經濟改革充滿興趣。當許多國家從化石燃料轉移到電力時，有一個「誰將支配未來的汽車工業」的競爭正在進行著。此一轉移有幾個階段。首先是已經上市的油電混合車，它使用來自電池和汽油的結合電力。此一設計使用一種小型內燃機以解決存在已久的電池問題：要創造一種既能長程運作又能提供瞬間加速的電池非常困難。

但混合車只是第一步。例如，這種插電式混合車有一個電池，電力可以

讓汽車先跑最初的大約五十英里，然後才將開關轉為使用汽油引擎。由於多數人上班購物都在五十英里以內進行，所以這些汽車在這段時間都是使用電力推動。

混合車的一個主要參賽者是通用汽車公司製造的雪佛蘭伏特（Chevy Volt）。它的最大行程為四十英里（使用鋰子電池），若使用小汽油引擎則可跑三百英里。

然後又有了完全沒有汽油引擎的泰斯拉敞篷車（Tesla Roadster）。它由位於矽谷的泰斯拉汽車公司製造。該公司是北美唯一銷售一系列全電力汽車的公司。這輛敞篷車是流線型跑車，速度可與燃燒汽油的車子等量齊觀，使人不再以為電動鋰子電池難與汽油引擎匹敵。

我曾有機會駕駛一輛二人座的泰斯拉。它的主人是Discovery頻道的母公司「發現傳播」（Discovery Communications）之創立人約翰‧漢德立克斯（John Hendricks）。當我坐入駕駛座時，漢德立克斯慫恿我把加速器踏到底，以便測試他的車子。我接受他的建議，用力一踏。突然，我感受到力量突然加強。當車子在三‧九秒內已經加速到時速六十英里時，我的身體深陷座位。光是聽到工程師吹噓純電動車的表現，和實際踏下加速器去親自感受，完全是兩回事。

泰斯拉的成功行銷，已經迫使主流汽車廠在放棄電動車數十年之後，努力跟上腳步。羅伯特‧魯茲（Robert Lutz）在他還是通用汽車副總裁時曾說：「所有通用公司的天才一直說，鋰電池科技還需要十年時間，而豐田汽車公司也同意我們的看法——然後，砰！泰斯拉來了。所以我說，『為什麼一個這麼小的加州新公司，由完全不懂汽車事業的人帶領，卻能辦到這點，而我們不能？』」

日產汽車率先對一般消費者開賣純電動汽車。它被稱為「葉子」（Leaf），最大行程一百英里，最高速時可達九十英里，而且是純電動。

純電動汽車之後，另一種最終將會送進展示間的汽車是燃料電池汽車，它有時也被稱為未來車。二○○八年六月。本田汽車公司宣布，世界第一輛上市的燃料電池汽車FCX Clarity問世。車程二百四十英里，最高時速一百英里，標準四門轎車的裝備也應有盡有。僅以氫為燃料，它不需加油，也不需充電。不過，由於供應氫氣的基礎建設闕如，目前只有在

美國南加州租得到。本田也已經在為它的燃料電池汽車的跑車版FCX Sport打廣告。

二○○九年，通用汽車公司在舊經營團隊大致都被開革後，走出破產的陰影，宣布它的燃料電池汽車雪佛蘭春分（Chevy Equinox），已經通過百萬英里測試。過去二十五個月，有五千人曾經試開過一百輛這種車。底特律對介紹小型汽車科技和混合車素來都比日本慢半拍，現在力圖振作，以求立足未來。

表面上，燃料電池汽車非常完美。它以氫和氧的結合，轉化成電能，留下水排出。它連一盎斯的煙霧都沒有。燃料電池的尾管看來有點怪異。沒有從屁股排出令人窒息的毒性煙霧，看到的只有無毒無色的水滴。

曾經試開十天雪佛蘭春分的麥克‧史瓦伯（Mike Schwabl）說出他的觀察：「你將手放在排氣筒出口上，流出來的只有水。實在酷極了。」

燃料電池科技並非新鮮事。基本的原理早在一八三九年就已經演示過。NASA曾經用燃料電池推動它的器具進入太空，長達數十年。真正新鮮的是，汽車工廠決心增加產量以降低成本。

燃料電池面對的另一個問題，是福特當年行銷T型汽車時所碰到的相同問題。批評家聲稱，石油是危險物品，人們將死於可怕的車禍，在撞車時被活活燒死。還有，幾乎每一個街角，都得要有加油站。所有這些觀點，批評家都是對的。每年都有數千人死於可怕的車禍，也到處看得到加油站。但是汽車的方便性和實用性實在太棒，以致於人們忽視了這些事實。

現在，同樣的反對聲浪已經被拿來反對燃料電池。氫燃料容易揮發和爆炸，氫的充氣站將會每隔數條街就有一個。批評家非常可能還是對的。但，一旦氫氣的基礎建設完成，人們會發現無污染的燃料電池汽車實在太方便，以致於他們願意忽略這些事實。今天，全美國只有七十個燃料電池汽車的氫氣補充站，那意味著你開車的時候，要小心地盯著油表。但這點將會逐漸改變，特別是在燃料電池汽車因大量生產和技術進步使價格開始下降後。

但是電動汽車的主要問題，在於電池無法憑空創造能源。你必須先為電池充電，而那電力通常來自燃煤發電廠。所以，雖然電動汽車是零污

染，但它們能源的來源終點還是化石燃料。

氫氣不是能源的純粹製造者。它比較算是能源的攜帶者。你必需首先創造出氫氣。所以雖然電動和燃料電池汽車帶來免於污染的希望，它們所用能源大部分還是來自燃煤的問題，依然會是個問題。最後我們還是會碰到熱力學的第一原理：物質和能量的總量無法消滅，或無中生有。你不能把沒有變成有。

這意味著，在我們從石油轉換到電力時，我們必需以完全新形式的能源取代燃煤發電廠。

核子分裂

創造能量（而非僅僅傳送能量）的一種可能是分裂鈾原子（uranium atom）。優點在於核子能不會如同燃油或燃煤發電廠，製造大量的溫室氣體。但是數十年來，技術上和政治上的問題，卻將核能發電打上死結。美國的最後一個核能發電廠於一九七七年開始建造，兩年後發生了致命的三哩島事件，商業核子能從此一蹶不振。車諾比一九八六年的毀滅性事件則為核子電力的命運貼上一個世代的封條。核子電力計畫在美國及歐洲枯萎了，剩下法國、日本和俄國僅賴政府補貼維持一線生機。

核子能的問題是，當分裂鈾原子時，會製造出大量核子廢料，其放射線將持續數千到數千萬年。一個典型的十億瓦反應爐，一年製造大約三十噸高階輻射性的核子廢料。它的放射性強到夜間會發光，必須儲存於特殊的冷卻池中。以美國現有一百個商用反應爐來說，每年製造的高階輻射廢料高達數千噸。

由於兩個理由，核子廢料會帶來問題。第一，即使反應爐關閉，它仍然維持熱度。如果冷卻水意外關閉（像三哩島一樣），爐心就會開始熔化。如果這些熔化的金屬接觸到水，它就可能造成蒸汽爆炸，將反應爐爆開，噴出很多噸的放射性的碎片到空中。在最嚴重的第九級意外，我們必需立即撤退數以百萬計的人民，到反應爐之外十至五十英里處。印第安點（The Indian Point）反應爐就在紐約市北方二十四英里處。一個政府研究推估，如果印第安點發生的一次意外，可以想像會造成數千億美元的財產損失。在三哩島，反應爐離重大災難的發生只有數分鐘，差點就癱瘓東北地區。當工作人員成功地引進冷卻水到爐心時，其中的二

氧化鈾再遲三十分鐘就要熔毀。災難在最後關頭被解除。

在基輔之外的車諾比，情況更加嚴重。安全機制（控制棒）被工作人員破壞。一小股電力升高，使反應爐失控。當冷水突然遇到熔化的金屬時，產生了氣爆，將整個反應爐頂掀開，將爐心的碎片大量撒向空中。許多被送進去控制意外的工人，最後都因放射性灼傷而慘死。由於反應爐的燃燒失去控制，最後招來空軍。有特殊防護罩的直升機被送進去，向著火的反應爐撒下硼酸水。最後，爐心被固體水泥封起來。即使到了今天，爐心仍不安定，持續產生熱量和放射線。

除了熔毀和爆炸，還有廢料的問題。該把它放在哪裡？實在令人難堪，進入原子時代已有五十年，卻仍無答案。過去，有一連串關於永久處理廢棄物所造成代價昂貴的失誤。最初，某些廢棄物被美國和蘇俄輕易地丟進海洋，或埋進地窖。一九五七年，烏拉山一個鈽廢棄場甚至發生災難性爆炸，引發大規模撤離，並造成思維爾德洛夫斯克（Sverdlovsk）和車里雅賓斯克（Chelyabinsk）之間四百平方英里區域的放射性損害。

一九七○年代，美國本來嘗試將高階輻射廢棄物埋藏於堪薩斯州里昂斯（Lyons）的鹽礦中。但是後來發現，這些鹽礦不能用——它們已經因為石油和天然氣的鑽探，造成遍布窟窿。美國被迫關閉里昂斯的礦場，這是一次尷尬的挫折。

其後二十五年，美國花費九十億美元於研究並建造位於內華達州的尤卡山（Yucca Moutain）廢料處理中心，而又於二○○九年被歐巴馬總統取消。地質學家曾作證說，尤卡山的場地可能無法維持核廢料一萬年。尤卡山的場地永不開放，被遺棄的是沒有永久存放核廢料設備的商業運轉核子發電廠。

現在，核能的未來並不明確。對於每個新核能發電廠耗資數十億美元的投資案，華爾街仍如驚弓之鳥。但是，核能業界聲稱，至少最新一代的發電廠比以前安全。同時，能源部對於核能仍然持開放態度。(譯注1)

核子擴散

然而，大的力量也帶來大的危險。例如，在挪威神話中，維京人崇拜以智慧和正義掌管眾神之家的歐丁（Odin）。歐丁領導的諸神包括英勇的

索爾（Thor）——他的榮耀和英雄事蹟一直是任何戰士所最珍惜的。但是，另外還有被忌妒與恨意所毀的惡作劇之神洛基（Loki）。他總是善於設計騙局並贏得勝利。最後，洛基與巨人們密謀帶來黑暗與光明的最後一戰，也就是萬物滅絕的史詩戰爭。

今日的問題是，國家之間的忌妒與恨意，可能釋放核子的世界末日。歷史顯示，當一個國家掌控了商業核子科技，如果它有慾望和政治意志，就可能轉變為核子武器。危險的是，核子武器科技將會擴散至世界最不穩定的某些地區。

二次世界大戰期間，只有最大的國家有資源、技術和能力用來發明原子彈。但在未來，當濃縮鈾的價格因新技術的引進而降低時，門檻將急遽降低。這就是我們所面臨的危險：新而廉價的科技可能使原子彈落入不穩定之手。

製造原子彈的關鍵在於獲得大量鈾礦然後將它純化。這意味著將鈾238（占天然鈾的百分之九十九·三）與鈾235（可造原子彈，但只占百分之○·七）分離。這兩種同位素在化學上是相同的，所以唯一能可靠地分開兩者的方法，就是運用鈾235比它的堂兄弟輕百分之一的這個事實。

在第二次世界大戰期間，分離同位素鈾的唯一方法，就是氣體擴散的實驗室過程：將鈾變成氣體（六氟化鈾），然後讓它通過數百英里的管子和薄膜。在漫長的旅程終點，較快的（也就是較輕的）鈾235贏得賽跑，留下落後的鈾238。在含有鈾235的氣體被提煉後，這個過程又重新進行，直到鈾的濃度由百分之○·七上升到百分之九十（那是炸彈等級的鈾）。但是推動氣體需要大量電力。戰爭期間，全美的電力供應，有明顯的一大部分被引導至田納西州橡樹嶺（Oak Ridge）的國家實驗室，以完成此一目標。濃縮設施極為巨大，占地兩百萬平方英尺，雇用一萬二千工作人員。

戰後，唯有超級強權（美國和蘇聯）有能力積累大量的核子武器（高達三萬件），因為只有他們掌握氣體擴散技術。但今天，只有百分之三十三的濃縮鈾來自氣體擴散。

第二代的濃縮工廠使用較精緻、較便宜的科技：超高速離心器（utracentrifuges）。它的出現已經在世界政治創造了劇烈的移動。超高

速離心器可以將一個裝著鈾的容器，每分鐘旋轉十萬次。這使鈾235和鈾238在大量的鈾之中突出百分之一的不同。最後，鈾238沉到底部。經過許多次旋轉以後，可以將鈾235從試管的頂端取出。

超高速離心器使用能量的效率比氣體擴散高五十倍。全世界約有百分之五十四的鈾使用這個方法淨化。

有了超高速離心器科技，只需一千個超高速離心器連續作業一年，就能製造出一個原子彈所需的濃縮鈾。超高速離心器科技很容易被偷。在核子安全歷史上最糟的違反事件中，一個鮮為人知的原子工程師卡迪爾·汗（A.Q.Khan）能夠偷到超高速離心器和原子彈零件的藍圖，並出售圖利。一九七五年他在阿姆斯特丹為鈾濃縮大廠URENCO工作。該公司是由英國、西德和荷蘭共同創立，旨在提供鈾給歐洲反應爐。他提供這些機密藍圖給巴基斯坦政府，巴國政府把他譽為國家英雄。他也被懷疑，將這個機密賣給薩達姆·海珊（Saddam Hussein）和伊朗、北韓及利比亞政府。

使用這些偷來的科技，巴基斯坦能夠創造出少量核子武器，於一九九八年開始測試。接踵而來的巴基斯坦與印度之間的核子競賽（雙方各自試爆系列原子彈），幾乎導致兩國之間的核子衝突。

可能由於擁有購自卡迪爾·汗的技術，據報導伊朗正加速其核子計畫，於二○一○年建立八千個超高速離心器，並有意增建三萬個。這又對其他中東國家造成壓力，打算製造自己的原子彈，使得局勢更不穩定。

二十一世紀地緣政治將會被改變的第二個理由是，另一個世代的濃縮技術——雷射濃縮法——已經上網，這是一種可能比超高速離心器更加便宜的方法。

如果你檢驗這兩種同位素鈾的電子外殼，它們顯然相同，因為原子核電荷一樣。但如果你仔細分析電子外殼的誤差，你會發現鈾235和鈾238的電子外殼之間的能量有細微的不同。透過照射極為穩定的雷射光，你可以從鈾235外殼打掉電子，但對鈾238卻不行。一旦鈾235原子被離子化，它們可以透過電子場輕易與鈾238區分。

但由於這兩種同位素的能量差別實在太小，以致許多國家嘗試利用此一事實而失敗。在一九八○年代和一九九○年代，美、法、英、德、南非

和日本都曾試圖掌握此一困難科技而未獲成功。在美國，甚至有一個嘗試動員五百位科學家、花費二十億美元的計畫。

但在二○○六年，澳洲科學家宣布，它們不但解決了這個問題，還打算將它商業化。由於由燃料的成本有百分之三十是來自濃縮過程，這個澳洲的矽石公司（Silex）認為，這種科技有其市場。矽石公司甚至與奇異公司簽約開始商業化。他們希望最後能用這個方法製造全世界三分之一的鈾。在二○○八年奇異日立核子能公司宣布，計畫在北卡羅來納州的威爾明頓（Wilmington）建造第一個商用雷射濃縮工廠。這個工廠在一千六百英畝的園區中占地二十英畝。

對於核能發電工業而言，這是好消息，因為它將在未來數年內把濃縮鈾的成本降低。不過，其他人則感到憂心，因為這種科技擴散至世界不安定地區，只是時間問題。換言之，我們目前仍有機會可以簽訂條約，來限制和管理濃縮鈾的流程。除非我們管制此一科技，否則原子彈將會繼續擴散，甚至可能落入恐怖團體手中。

我認識的人中，有一位是去世不久的希歐多爾‧泰勒（Theodore Taylor）。他由於為五角大廈設計一些最大和最小的核子彈頭而享有難得的盛名。其中一種設計名為「戴維‧克羅克特」（Davy Crockett），它是重量只有五十磅，但足以對敵人投擲小型原子彈。泰勒是如此的忠誠核子彈擁護者，因而他又為「獵戶座計畫」（Orion project）工作，該計畫將使用核子彈推動太空船至接近的恆星。他計算，透過在尾端拋擲系列核子彈，造成的震動可以推動這種太空船到接近光速。

我問他，為什麼他對設計核子彈的理想會幻滅，並轉而為太陽能工作。他對我透露，他一再作惡夢。他感覺到，他的核子武器工作，將導致一件事：製造第三代核子武器。一九五○年代第一代彈頭巨大而難以攜帶至目標。一九七○年代第二代彈頭較小巧，可以將十個彈頭同時裝進一個飛彈的鼻錐體。但第三代核子彈是「設計者炸彈」，針對不同環境需求而設計，如，森林、沙漠，甚至外太空。這種第三代炸彈是迷你原子彈，小到恐怖分子可以用手提箱攜帶，去摧毀整個國家。他一生的作品，可能有一天會被恐怖分子利用的想法，從此一直縈繞心頭，揮之不去。

世紀中期（二○三○─二○七○）

到了世紀中期，化石燃料經濟的完全影響將會達到高峰：全球暖化。無可置疑地，地球的溫度正在升高。上一個世紀，地球的溫度上升華氏一·三度，而且正在加速中。跡象隨處可見，我們不會看走眼：

☆北極冰層的厚度僅僅在過去五十年，就驚人地減少了百分之五十。多數北極冰層只是剛好在冰點以下，浮在水上。所以，它對於海洋微小的溫度變化特別敏感，如同金絲雀在礦井中，它扮演著早期警告系統的角色。今天，部分北極冰帽在夏季消失，也可能提早到二○一五年就會在夏天全部消失。北極冰帽可能在本世紀末永遠消失，以改變海洋氣流和地球周圍的氣流，來擾亂世界的氣候。

☆格陵蘭冰棚在二○○七年縮小了二十四平方英里。這個數字在二○○八年升高到七十一平方英里。（如果格陵蘭全部的冰因某種因素融化，全世界海平面將上升二十英尺。）

☆過去數萬年一直很穩定的南極州大冰塊，正逐漸破裂。二○○○年，大約與康乃狄克州同樣大小，包含四千二百平方英里的冰塊裂開了。二○○二年，一塊與羅德島州同樣大小的冰塊從特懷特冰川（Thwaites Glacier）裂開。（如果南極洲的冰全部融化，全世界的海平面將會上升一百八十英尺。）

☆海洋每垂直上升一英尺，則海洋的水平面擴充一百英尺。過去的一個世紀，海平面已經上升八英吋，主要是由於海水溫度增加而擴充。依據聯合國資料，海平面到了二一○○年將上升七至二十三英吋。有些科學家說，聯合國在詮釋資料時過於小心。依據科羅拉多大學北極與高山研究所科學家的研究，到了二一○○年，海平面將上升三至六英尺。所以世界地圖的海岸線將逐漸改變。

☆十七世紀末期氣溫開始有了可靠的紀錄；一九九五年、二○○五年和二○一○年是有紀錄以來最熱的年份。而二○○○年至二○○九年則是最熱的十年。同樣地，二氧化碳含量迅速上升。達到十萬年以來最高程度。

☆在地球暖化的過程，熱帶疾病會逐漸北移。最近散布開來的由蚊子攜帶的西尼羅河病毒（West Nile Virus），可能就是一個前兆。聯合國官

員特別關心瘧疾向北傳播的情況發生。通常許多有害昆蟲每年冬季土地凍結時都會死亡。但是冬天的縮短，也意味著危險昆蟲的北侵無法改變。

二氧化碳——溫室瓦斯

依據聯合國的政府間氣候變遷委員會，科學家下結論說，全球暖化有百分之九十的可能，是由人類的活動所帶動，特別是透過燃燒石油和煤炭製造二氧化碳。日光很容易穿透二氧化碳。但當日光照暖了地球，它創造了紅外線輻射，這種輻射卻不容易穿透二氧化碳折回。來自日光的能量因為無法逃入太空，而被捕捉留在地球。

我們也在溫室或汽車看到了類似效應。陽光使氣溫升高，而氣溫卻因玻璃的阻隔而難以逸出。

不幸地，二氧化碳的產生總量呈爆發性成長，特別是過去的一個世紀。在工業革命以前，空氣中二氧化碳的含量是二百七十百萬分率（ppm）。現在已大幅上升至三百八十七百萬分率。（在一九九○年，全世界消耗一億五千萬桶石油。二○○○年，跳到二百八十億桶，大增一百八十五倍。二○○八年由於燃燒化石燃料和森林砍伐，被送進大氣層的二氧化碳有九十四億噸，但只有五十億噸被循環進入海洋、土地和植物。其餘將會留在空中數十年，使地球暖化。）

訪問冰島

如果對冰的核心加以分析，我們就可以觀察出溫度的上升並非偶發事件。科學家鑽探北極古代冰層深處，已能抽出數千年前的氣泡。對這些氣泡裡的空氣做化學分析，科學家可以重建過去超過六十萬年大氣的溫度和二氧化碳含量。很快地，他們就能斷定一百萬年前的天氣。

我有機會目睹這一點。我曾到冰島首都雷克雅維克作一次演講，有榮幸訪問冰島大學，冰的核心就是在那裡進行分析。當你的飛機降落於雷克雅維克時，放眼所見只是白雪和鋸齒狀的岩石，彷彿荒涼的月表。雖然不毛和嚴峻，這個地形使北極成為分析數十萬年前地球氣候的理想地方。

當我訪問他們那座一直維持在冰點以下的實驗室時，必須先通過厚厚的冰庫門。一到裡面，我看到許多架子上面有很多長長的金屬管，直徑約一英吋半，長度約十英尺。每一個管子都曾鑽入冰河的冰塊深處。當管子穿透冰時，它取得了數千或數萬年前落雪的樣本。當管子被移除時，我可以小心檢驗每一支管子內的結冰內容。剛開始，我只能看到一長條的白色冰。但經過較接近的檢查，我可以看到冰上有由不同顏色細圈所構成的條紋。

科學家必須用各種技術去確定他們的時期。某些冰層含有顯示重要事件（如火山爆發逸出的煤灰）的標記。由於這些爆發日期已經正確知悉，所以我們可以用它們來斷定那個層冰有多老。

這些冰核心接著被切成許多片，以便檢驗。當我從顯微鏡去看其中一片時，我看到小小的微細氣泡。我猛然發覺，我正在看的是好幾萬年前，甚至比人類文明興起還早時就已寄存的氣泡。

每一個氣泡內的二氧化碳含量很容易測定。但要計算這冰開始儲存時的氣溫則較為困難。（要進行這點，科學家分析氣泡中的水。水分子可能含有不同的同位素。當溫度降低時，較重的水同位素凝結的速度比平常水分子快。因而，透過度量較重同位素的數量，就可以計算水分子凝結時的溫度。）

最後，經過辛苦地分析數千冰河核心的內容，這些科學家獲得一些重要的結論。他們發現，溫度和二氧化碳的數量，像是兩輛雲霄飛車同步平行起伏數萬年。當其中一條曲線向上或向下，另一條線也會跟著上下。

最重要的是，他們發現一個溫度和二氧化碳含量突然升高的地方，發生時間剛好就在上一個世紀。這是很不尋常的，因為多數波動都是數千年才會有緩慢的改變。科學家聲稱，這個不尋常的激增並非自然增溫的一部分，而是人類活動的指標。

另外還有其他的方法可以顯示這個激升的波峰，是因人類活動而起，並非自然循環的一部分。電腦模擬現在已經非常先進，可以模擬有和沒有人類活動出現時地球的溫度。沒有文明製造二氧化碳時，我們發現相對平坦的溫度曲線。但加上人類活動後，就會顯示出有一個溫度和二氧化碳同樣激增的波峰。這個預測的波峰與實際的波峰剛好吻合。

最後，我們可以測量照射在每一平方英尺地表的陽光數量。科學家也可以計算從地面反射回到外太空的熱量。正常情況，我們預期這兩個數量會相等，也就是輸入等於輸出。但事實上，我們發現有淨餘額的能量正在使地球加溫。然後如果我們計算人類活動所製造的能量總數，我們會發現完美的匹配。因而，人類活動是導致地球暖化的原因。

不幸地，即使我們突然停止製造任何二氧化碳，已經釋放在大氣層中的氣體，也足以在未來數十年內使全球繼續暖化。

結果，到了世紀中期，情況可能很悲慘。

科學家已經畫出地圖，顯示出如果海平面繼續升高，世紀中期以後的海岸城市會如何。海岸城市可能消失。曼哈頓很大的部分必須撤退，而華爾街則在水下。政府必須決定哪一個大城和首都值得解救，哪些則沒希望了。有些城市也許可以用複雜的堤岸和水門的結合搶救下來，其他城市可能被判定無望，讓他們消失在海洋中，因而導致大量人口遷移。由於世界上多數商業和人口密集中心都鄰近海洋，這將對世界經濟產生災難性的作用。

即使某些城市能被解救，仍然有可能因為暴風雨而將大浪送進城市，癱瘓其基礎建設的危險。例如，一九九二年，暴風雨洪水流入曼哈頓，癱瘓了通往新澤西州的地下鐵和火車。交通遇上水災，經濟就要忍受停頓。

水淹孟加拉和越南

聯合國政府間氣候變遷委員會的一個報告，特別指出三個可能發生災難的熱點：孟加拉、越南湄公河三角洲和埃及尼羅河三角洲。

最糟的情況在孟加拉，這個國家即使沒有全球暖化問題，也經常因暴風雨發生水災。全國大部分地區平坦，與海平面等高。雖然其經濟狀況在過去數十年有顯著成長，但它仍是世界上人口最密集、最貧窮的國家之一。（它的人口一億六千一百萬，與俄羅斯相同，但土地只有一百二十分之一。）如果海平面升高三英尺，大約百分之五十的土地會被水永遠淹沒。那裡天然災難每年都會發生，就在一九九八年九月全世界都預先看到在將來會成為理所當然的狀態。大洪水淹沒全國三分之二，一夜之

間留下三千萬無家可歸的災民；一千人死亡，六千英里道路被毀壞。這是現代史上最嚴重的自然災難。

另一個會因海平面上升而陷入極度不安的國家是越南。它的湄公河三角洲特別脆弱。到了世紀中期，這個人口八千七百萬的國家，可能面臨主要糧食產地的崩潰。越南半數的稻米產於湄公河三角洲（居民一千七百萬）。由於海平面的上升，這個地區大部分將永遠被海水淹沒。依據世界銀行的統計資料，到了世紀中期，如果海平面上升三英尺，全部人口的百分之十一將被迫離開家園。湄公河三角洲也將被鹽水淹沒，永遠摧毀這個地區肥沃的地區。如果數以百萬計的人民被迫離開家園，難民潮將湧向胡志明市（原稱西貢）尋求庇護。但這個城市也會有四分之一在水下。

二○○三年，五角大廈委託全球企業網（Global Business Network）進行一項研究。研究報告顯示，最壞的情況是：由於全球暖化，混亂會擴及全世界。數以百萬計的難民會越過國界，政府可能失去權威並且崩潰，所以國家會因搶劫、暴亂和混亂而沉淪。在這絕望的情境中，國家面對可能湧入的數百萬絕望的難民時，可能訴諸核子武器。

報告中說，「想像這樣的情景：巴基斯坦、印度和中國——都擁有核子武器——為了邊界難民、河水分配和可耕地而起衝突。」全球企業網的創辦人和五角大廈報告主要撰稿人彼得‧史瓦茲（Peter Schwartz）對我透露了此一情境的細節。他說，最大熱點將在印度和孟加拉邊境。在孟加拉將要面臨的一個主要危機中，高達一億六千萬人將會被驅離家園，引發人類歷史上的最大遷移。當邊界崩潰時，緊張急遽升高，地方政府癱瘓，大暴動爆發。史瓦茲預見會有國家以使用核武作為最後手段。

在一個最糟個案的情況中，溫室效應本身會自我強化。例如，北極地區凍原的解凍，可能從腐壞的植物釋放出數百萬噸的沼氣。北半球的凍原覆蓋超過九百萬平方英里的土地，其中含有數萬年前冰河時期凍結的植物。這個凍原含有的二氧化碳與沼氣，比大氣層現有的含量還要多。這點將對世界天氣產生巨大影響。還有，沼氣是一種遠比二氧化碳致命的溫室氣體。它並不會在大氣中停留很久，但造成的傷害遠大於二氧化碳。融化的凍原釋放出如此大量的沼氣，可使溫度迅速升高，而升高的溫度又造成更多沼氣的釋放，形成全球暖化的失控性循環。

情況很可怕，但我們還沒走到不歸路。控制溫室效應的問題，事實上主要是政治和經濟問題，而非技術問題。二氧化碳的製造與經濟活動（因而也是財富）同步。例如，美國製造的二氧化碳占全世界百分之二十五。這是因為美國的經濟活動占全世界的百分之二十五。在二○○九年，中國創造的溫室氣體，超越了美國，主要是因為它的爆發性經濟成長。這也是許多國家不情願積極處理溫室氣體的根本原因：它會干擾經濟活動和繁榮。

許多處理這個全球危機的方案被設計出來，但到最後，應急的權宜之計不能解決問題。唯有在消耗能源的方式上作主要的轉移，才能解決問題。嚴肅的科學家提倡某些技術性的衡量，但沒有一個贏得廣泛接受。這些提議包括：

☆將污染物質發射到大氣層。計畫之一是將火箭射至大氣層的上層，在那裡釋放污染物質（如二氧化硫），以便將日光反射回太空，因而冷卻地球。諾貝爾化學獎得主保羅‧克魯岑（Paul Crutzen）倡議，把污染物射入太空，作為「最後審判日裝備」，為人類制止全球暖化，提供最後逃生之路。這個構想根源於一九九一年，科學家小心監控菲律賓皮納圖博山（Mount Pinatubo）的巨大火山爆發時。火山噴出一百億公噸的火山灰和碎屑到大氣層上層。天空為之黑暗，導致全球溫度下降華氏一度。這個現象使我們有可能計算出，需要多少污染物來降低世界溫度。雖然這是一個嚴肅的擬議，有些批評家懷疑它能否解決自己造成的問題。巨量污染物對世界溫度會產生怎樣的影響，我們所知仍然不多。也許效益只是暫時的，或者未預期到的副作用可能比原來的問題更嚴重。例如，皮納圖博爆發後，世界降雨量突然降低，如果實驗出了差錯，它可能導致類似的大旱災。據估計，若作這樣的實地測試，成本可達到一億美元。因為硫酸鹽氣膠（sulfate aerosols）的效應是短暫的，可能每年要花最少八十億美元，才能將它們大量注入大氣層。

☆創造藻類的大量繁殖。其中一個建議是將鐵基（iron-based）化合物丟入海中。這些礦物營養將導致海洋中藻類的大量滋生，而藻類將會吸收較多二氧化碳。在加州的浮游生物公司（Planktos）宣布，它將單方面地開始作私人努力，以鐵質在南大西洋施肥，希望謹慎地促成浮游生物的大量繁殖，讓它們吸收空中的二氧化碳。其後，管制海洋廢棄物的

《倫敦公約》（London Convention）的締約國，對此一努力發表一個「關切聲明」。另外也有一個聯合國團體呼籲暫時終止此種試驗。這個試驗在浮游生物公司在經費用盡以後就停止了。

☆碳隔離。另外還有一種可能性，就是使用碳隔離——這是一種在二氧化碳由燃煤發電廠散發時，將它液化並與環境分離（也許埋在地下）的過程。雖然這在理論上行得通，卻是極為昂貴的過程，而且此一過程無法除去已經升到空中的二氧化碳。二○○九年，工程師小心監控第一次主要的碳隔離試驗。西維吉尼亞州始建於一九八○年的巨大發電廠登山家（Mountaineer）被翻新改造，以便將二氧化碳自環境中分離。它成為美國第一個做隔離實驗的燃煤發電廠。液化的氣體將被注入到七千八百英尺的地下，最終變成一層石灰岩。這些液體最後會形成三十至四十英尺高數百碼長的一大塊。發電廠的主人（美國電力公司）計畫每年注入十萬噸二氧化碳，連續二至五年。這些只占這個發電廠每年逸出量的百分之一‧五，但最後隔離系統可以抓住百分之九十。初期的費用大約七千三百萬美元。但如果成功了，這個模式就可以迅速散布到其他發電站，例如附近的四個發電量六十億瓦的巨大發電廠（因為量大，所以這地區被稱為大瓦谷）。還有很重要的未知事項：二氧化碳是否最終會遷移或液化氣體會不會與水結合（也許成為會污染地下水的碳酸）。不過，如果這個計畫成功，它將是用以對付全球暖化的混合科技中很好的一部分。

☆基因工程。另一個建議是使用基因工程，去特別創造可以吸收大量二氧化碳的生命形式。約翰‧克雷格‧文特爾（J.Craig Venter）是此一方式的熱情倡議者。他因開發高速科技提早一年成功地為基因定序，而贏得名聲並發財。他說：「我們將基因組視同細胞的軟體，或甚至是作業系統。」他的目標是重寫那軟體，將微生物的基因修正，甚至從頭建構，因而它們能夠吸收來自發電廠的二氧化碳，將它轉化為有用物質，例如天然瓦斯。他寫道，「我們的地球上已經有數千，甚至數百萬的生物知道如何做到這一點。」關鍵在於修正它們，使它們可以增加輸出，並能在燃煤廠繁衍。他樂觀地說：「我們認為此一領域有很大的潛能，可以替代石油工業，也許就在數十年內。」

普林斯頓大學物理學家弗里曼‧戴森倡議另一種略有差異的版本——創造各種可以適應並吸收二氧化碳的基因工程樹。他說，也許一兆棵這種樹足以控制空中的二氧化碳。在他的論文〈我們能控制空中的二氧化碳

嗎？〉中，他主張創造「快速成長樹」的「碳銀行」，以管制二氧化碳含量。

不過，如同任何大量使用基因工程的計畫，人們必須對副作用很小心。就像我們無法像召回有瑕疵的汽車一般來召回生命形式。一旦它被釋放到環境中，這種基因工程生命形式，可能對其他生命形式產生意想不到的後果，特別是在它取代了當地的植物物種，並破壞了食物鏈的平衡時。

可悲的是，政治人物顯然缺乏興趣去支持任何這類的計畫。不過，總有一天，全球暖化會達到痛苦和引起混亂的階段，使得政治人物被迫執行其中的一些計畫。

決定性的時期將是未來數十年。到了世紀中期，我們應當是在氫氣時代，那時融合、太陽能及可再生能源的結合，將給我們一種對化石燃料依賴較少的經濟。市場力量和氫科技的結合，應能使我們對全球暖化有了長程的對策。危險的時期就是在氫氣經濟就位以前的現在。短期內，化石燃料仍是產生能量最便宜的方法，因而全球暖化將在未來數十年造成危險。

融合發電

到了世紀中期，改變遊戲規則的新選擇形成：融合。到那時，它應當是所有已確定科技中最有效的，也許會為我們永久地解決問題。分裂發電依靠鈾原子的分裂產生能量（以及大量核子廢料），而融合發電則依賴氫原子和高溫的融合，因而產生多出許多的能量（只有很少廢料）。

融合發電跟分裂發電不同，它釋放太陽的核能。深埋於氫原子內部的是宇宙的能源。融合電力照亮太陽和天堂。它是恆星的祕密。任何能夠成功地駕馭融合電力的人，將可釋放無限的內在能量。而這些融合發電廠的燃料來自平常的海水。同樣一磅對一磅，融合釋放的能量比石油大一千萬倍。一瓶八盎斯的水，等同五十萬桶石油所含能量。

融合（而非分裂）是大自然所偏愛的賦予宇宙能量的方式。在星球形成時，一個氫含量豐富的氣體球漸漸被重力壓縮，直到它開始發熱至極高的溫度。當氣體達到大約五千萬度（因個別情況而不同）時，氣體內部

的氫核子互相猛擊，直到它們融合形成氦（helium）。在這過程，大量的能量被釋放，導致氣體被點燃。更正確地說，壓縮必須滿足所謂「勞森標準」（Lawson’s criterion）——你必須壓縮特定密度的氫氣，達到特定溫度，經過特定的時間。如果這三個有關密度、溫度和時間的條件都符合，你就會有融合反應，不管是氫彈、恆星或反應爐中的融合都是如此。

所以關鍵在於，對氫氣加熱並壓縮，直到核子融合，釋放宇宙的能量。

但是，以前想要駕馭宇宙能量的嘗試都失敗了。要把氫氣加熱到數千萬度，直到核融合（nuclei fuse）成為氦氣，並釋放巨大能量是極其困難的任務。

還有，大眾對於這些主張仍然存有疑慮，因為每隔二十年，都會有科學家聲稱，只需再過二十年就能達成融合發電。但經過好幾十年的聲明，物理學家逐漸確信，融合發電終於要來了，最早可能在二○三○年。在世紀中期的某一時期，我們可以看到融合發電廠呈點狀散布於郊外。

大眾有權對融合持懷疑態度，因為過去曾經發生太多騙局、作假和失敗。回到一九五一年，那時美蘇兩國深陷冷戰的狂亂中，狂熱地發展第一個氫彈。阿根廷總統胡安‧裴隆（Juan Perón）在號角聲中和緊急記者會中宣布，他的國家的科學家已經在控制太陽能量方面有了重大突破。這個故事引發國際媒體關注。雖然這個消息似乎是難以置信，但卻登上了《紐約時報》的第一版。裴隆吹牛說，阿根廷在超級強權失敗的地方有了重大的突破並且得分。一個沒什麼名氣、說德語的科學家隆那德‧李曲特（Ronald Richter）說服裴隆以經費支持他的「熱測公司」（Thermotron）——該公司許諾提供阿根廷無限能源和永恆的榮耀。

當時仍在與融合搏鬥，以便在與俄羅斯製造氫彈的競爭中領先的美國科學界聲明，阿根廷的宣布沒有意義。原子科學家拉夫‧拉普（Ralph Lapp）說：「我知道阿根廷所使用的是另一種材料，就是謊言！」

新聞界很快地給它「謊言炸彈」的綽號。原子科學家大衛‧李連索（David Lilienthal）被問到，有沒有「微小的機會」顯示阿根廷人可能是對的。他想都不想就回答：「比那個更小！」

在強烈壓力下，裴隆只是堅持他的立場，暗示超級強權因阿根廷搶了他

們的風采而忌妒。當裴隆的代表在次年訪問李曲特的實驗室時，揭露真相的時刻終於來臨。在輿論抨擊下，李曲特的行動日漸怪異。當檢查的人員到來時，他以氧氣筒敲開實驗室的門，然後在一張紙上草草書寫「原子能」。他訂購火藥準備放入反應爐。評論家的結論是，他可能發瘋了。當檢查員把一片鐳放在李曲特的「放射線計量器」時，沒有反應。所以，顯然他的儀器也是假的。李曲特隨後被捕了。

而另一個最著名的案例是史坦利‧龐斯（Stanley Pons）和馬丁‧弗萊許曼（Martin Fleischmann）。他們都來自猶他大學、且是相當受尊敬的科學家。一九八九年，他們宣稱，已經掌握了「冷融合」（cold fusion），亦即在室溫下的融合。他們聲稱，把鈀金屬放進水中，它就奇蹟似地壓縮氫原子直至他們融合成氦氣，在桌上釋放出太陽的能量。

大震撼立即發生。幾乎全世界的報紙都將此一發現登在頭版。一夜之間，新聞人員談論著能源危機的結束，並且迎接無限能源的來臨。世界媒體繼續強迫性地狂熱報導。猶他州立即通過五百萬美元的法案，創立一個全國冷融合研究所。即使日本的汽車公司，也開始捐獻數百萬美元，用於推動此一熱門的新領域的研究。在冷融合周邊，也有個人崇拜開始浮現。

龐斯和弗萊許曼跟李曲特不同，他們是科學界廣受尊重的人，也樂於和他人分享研究結果。他們小心地展示設備和資料讓世人看。

但事情變得複雜了。因為實驗使用的儀器很簡單，全世界很多團體嘗試複製這些令人驚訝的結果。不幸地，多數團體未能發現淨釋出能量，聲明冷融合是一條死胡同。不過，這個故事繼續存活著，因為還有零星的團體聲稱，他們成功地複製了實驗。

終於，物理界也加入了。他們分析了龐斯和弗萊許曼的方程式，發現其中有缺陷。第一，如果他們的聲明是對的，中子的爆裂將會從瓶中水帶著輻射，殺死龐斯和弗萊許曼。所以他們倆人還活著的事實，表示實驗並不成功。如果他們的實驗達成冷融合，他們會死於輻射灼傷。第二，他們二人發現的比較可能是一種化學反應，而非熱核反應。最後，物理學家們下結論說，鈀金屬無法將氫原子結合到夠緊密使氫氣融合成氦氣。那會違反量子理論的原理。

但即使在今天，爭論並未完全止息。偶爾仍然會有某些人聲稱達成冷融

合。問題是，沒有一個人能夠在見證下達成冷融合。畢竟，如果你製造了一個偶爾才能發動的汽車引擎，有用嗎？科學是立基於可複製、可測試並且可接受檢驗，而且每次都能成功。

熱融合

但由於融合發電的優點實在太大，因而許多科學家仍隨時留意它誘人的召喚。

例如，融合製造最少的污染。它相對清潔，也是自然賦予宇宙能量的方法。融合副產品之一的氦氣，事實上具有很高的商業價值。另一副產品是有輻射性的鋼製融合室，最終必須被掩埋。它的危險性較輕，只有數十年。一個標準的鈾分裂發電廠，每年製造三十噸可持續數千年至數千萬年的高階核子廢料，相對而言，一個融合發電廠所製造的核子廢料實在微不足道。

還有，融合發電廠不會有毀滅性的熔毀。鈾分裂發電廠，更精確地說是因為它的爐心含有數噸重的高階核子廢料，即使在關閉後仍然會製造不穩定的熱量。是這些殘餘的熱量最終可以熔毀堅固的鋼，進入地下水，製造氣爆和中國綜合症（一九七九年同名電影，描述美國和電廠熔化，穿過地球直達中國）的夢魘。

融合發電廠本質上就比較安全。「融合性熔毀」是個矛盾的名詞。例如，如果有人關閉融合反應爐的磁場，熱電漿將會碰到容器的牆壁，而融合程序必然立即停止。所以一個融合發電廠，不會有失控的連鎖反應，一旦發生意外只會同時自行關閉。

「即使發電廠被夷平，一公里外的輻射將會小到沒必要撤退。」加州大學聖地牙哥分校能源研究中心主任法洛柯‧納吉馬巴迪（Farrokh Najmabadi）這樣說。

雖然商業融合發電有這麼了不起的好處，仍然有一個小細節：它並不存在。還沒人造出可以運轉的融合發電廠。

但是物理學家們持審慎樂觀看法。通用原子公司（General Atomic）負責監督美國最大融合反應爐DIII-D的大衛‧包得溫（David E.Baldwin）

說：「十年前，有些科學家懷疑融合是否可能，即使在實驗室中也一樣。現在我們知道融合會成功。問題只在經濟上是否實際。」

國家點燃設施——以雷射融合

所有這些，在少數幾年內可能有劇烈改變。

已有數種嘗試方式正在齊頭並進，而在走錯路數十年之後，物理學家們說，他們終於要達成融合了。在法國，有一個由許多歐洲國家、美國、日本及其他國家支持的國際熱核實驗反應爐（The International Thermonuclear Experimental Reactor,ITER）。在美國，有國家點燃設施（National Ignition Facility,NIF）。

我曾有機會訪問國家點燃設施的雷射融合機器，那是一個驚人的景象。因為與氫彈關係密切，這個反應爐座落於勞倫斯利弗摩爾國家實驗室——軍方在那裡設計氫彈。我必須穿過層層安全檢查，才能到達目的地。

當我抵達反應爐時，那真是一個令人驚嘆的經驗。我以前在大學實驗室看慣了雷射（事實上，紐約州最大的雷射實驗室之一，就在紐約市立大學、我的辦公室正下方），但看到NIF的設施，我整個人呆住了。它安裝於十層樓高、三個足球場大的建築物中，有一百九十二束巨大的雷射光向一個長長的隧道投射。它是世界上最大的雷射系統。傳送的能量比任何以前的雷射系統大六十倍。

在這些雷射光束射入長長的隧道後，它們最後會碰到大量陣列的鏡子。鏡子將所有的光束，聚焦於一個小小的針尖大小含有重氫和氚（deuterium and tritium，兩種氫的同位素）的目標。真令人難以置信，五百兆瓦的雷射電力聚焦於一個肉眼幾乎看不到的小點，使它熱度增高到一億度，遠比太陽中心還熱。（那個巨大脈動的能量，相當於五十萬個核電廠的瞬間輸出。）這個微小的點的表面迅速蒸發，釋放出一個衝擊波，使小點瓦解，並釋放出融合的能量。

它於二○○九年建成，目前正進行測試。如果一切順利，它可能是第一個可以創造出與它消耗的能量相當的機器。這個機器並非為製造商用電力而設計，它是設計來顯示，雷射光束可以聚焦來為氫含量豐富的材料

加溫，製造出淨得能源。

我與NIF設施的一個主任愛德華‧摩西斯（Edward Moses）談及他對這個計畫的希望和夢想。頭戴硬盔的他，不像是一個指揮世界最大雷射實驗室的頂尖核子物理學家，而更像是一個建築工人。他承認那裡曾有過很多失敗的開端，但他相信這次是真的：他和他的團隊即將實現一個重要到可以載入史冊的成就——第一個在地球上和平地捉住太陽的能量。與他對談，可以了解像NIF這種大計畫，需要虔誠信仰者的熱情和精力，來使它繼續存活。他告訴我，他夢想著有一天，能夠邀請美國總統來到他的實驗室，宣布歷史已經改寫。

但是開始時，NIF的出發情況很糟。奇怪的事不斷發生，像是NIF的前副主任邁克‧坎貝爾（Michael Campbell）被揭發普林斯頓的博士學位作假，被迫於一九九九年辭職。然後是完工日期，原定二○○三年，卻開始逾期。成本飛漲，從十億美元上升到四十億美元。它終於在二○○九年三月完成，足足延遲了六年。

他們說，魔鬼總是躲在細節之中。例如，在雷射融合，這些一百九十二個雷射光束必須極為精準地擊中一個小顆粒的表面，它才能均勻地爆炸。這些光束必須同時擊中小目標，誤差不能超過三十兆分之一秒。雷射光束稍有校對不準，或稍有異常，則小顆粒無法對稱地加熱，造成它會被吹到一邊，而非產生球狀的引爆。

如果小顆粒異常超過五十奈米（或一百五十個原子），它就無法均勻地爆炸。那就像嘗試在三百五十英里外要投擲一顆棒球以好球進壘。所以校準雷射光束和使小顆粒均勻是雷射融合面對的主要問題。

除了NIF，歐盟也支持自己版本的雷射融合計畫。這個反應爐，將建於高能雷射研究設施（HiPER）。它比較小，但可能比NIF有效。建築開始於二○一一年。

許多人的希望都寄託在NIF上面。不過，如果雷射融合無法如預期成功，這裡還有另一種甚至更進一步能控制融合的計畫：將太陽放進瓶子裡。(譯注2)

國際熱核實驗反應爐——磁場內的融合

另一種設計是在法國開拓出來的。國際熱核實驗反應爐使用巨大磁場來控制熱氫氣。相對於用雷射在瞬間把小顆粒的高量含氫物質解體，反應爐使用磁場慢慢地壓縮氫氣。機器很像巨大的中空鋼製甜甜圈，以線圈環繞甜甜圈的洞。磁場將甜甜圈形狀的容器裡的氫氣限制在內。然後電流通過氣體，將它加熱。磁場壓縮氣體和送電流通過，兩者結合使得瓦斯溫度增至許多百萬度。

使用「磁場瓶子」（magnetic bottle）來創造融合並非新觀念。事實上，早在一九五○年代就有了。但為什麼要花這麼長時間，這麼多延期，去將融合商業化？

其問題出在磁場必須正確地調整，才能均勻壓縮氣體，而不致膨脹或變成不規則。想像你拿著氣球，試著用手壓縮它，並讓氣球平均地壓縮。你會發現，氣球在手的間隙凸出，要均勻地壓縮幾乎不可能。所以，問題是「不穩定」，這是工程問題而非物理問題。

這似乎有點奇怪，因為星球輕易地壓縮氫氣，創造好幾兆個我們所見宇宙內的星星。大自然似乎在天堂不費力地創造星星，所以為何我們不能在地球上做這件事？答案涉及引力和電磁之間單純但巨大的不同。

引力，如同牛頓所示，是嚴格的吸引力。所以在恆星，氫氣的引力甚至將它壓縮為球體。（那就是恆星和行星是球形，而非立方體或三角形的原因。）但是電子的電荷有兩種類型：正電和負電。如果有人蒐集負電球，他們將會互相排斥而向所有的方向飛散。但如果將正電荷和負電荷放在一起，就會得到所謂「偶極」（dipole），產生複雜且像蜘蛛網般的電場線。相似地，磁場也會形成偶極；因而要在甜甜圈形室內均勻地壓縮熱氣體是極度困難的任務。事實上，需要超級電腦來規劃由簡單電子組合形成的磁場和電場。

在此歸納要點如下：引力是吸引力，可以把氣體均勻地壓縮成球體。星球可以不費力地形成。但磁場是吸引力和排斥力兼而有之，所以當被壓縮時，氣體以複雜方式突出，使得控制融合特別困難。這就是與物理學家僵持數十年的根本問題。

直到現在，物理學家才宣稱，ITER已經以磁場的約束打開穩定問題的死結。

ITER是最大的國際科學計畫之一。機器的核心包含一個甜甜圈形狀的金屬空間。總重量二萬三千噸，遠超過總重量只有七千三百噸的艾菲爾鐵塔。

零件實在太重，以致運送裝備的路徑必須特別更改。一個大型的護送卡車隊將運送這些零件，最重的有九百噸，最長的有四層樓高。ITER的建築將達十九層樓高，座落於一個面積等於六十個足球場的平台。預期這個計畫花費一百億歐元，由七個會員國（歐盟、美國、中國、印度、日本、韓國和俄國）分擔。

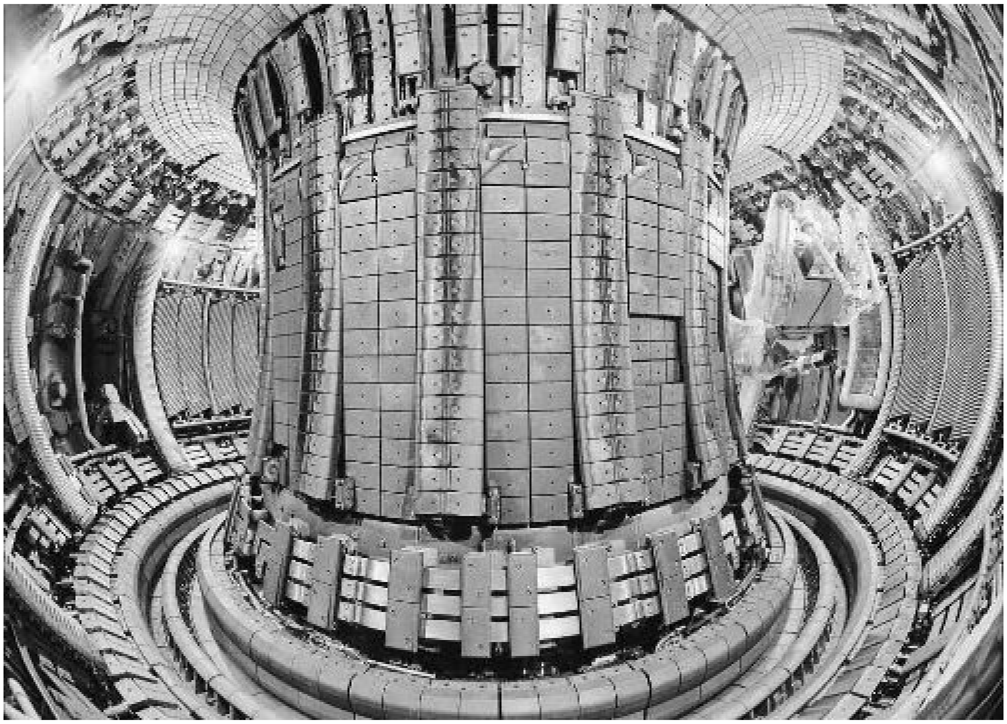
當它終於點燃時，將把氫氣加熱到華氏二億七千萬度，遠超過太陽核心的華氏二十七百萬度。如果一切順利，它將生產五億瓦能量，十倍於原來送進反應爐的總能量。現有的融合發電紀錄是一千六百萬瓦，由在英國牛津郡顧翰科學中心的歐洲聯合環形加速器（Joint European Torus,JET）產出。經過一些延期，現在設定能達到收支平衡的目標時間為二○一九年。

這個ITER目前還只是一個科學計畫。它並非設計來製造商業用電。但物理學家已經為下一步（把融合電力帶到市場）立下基礎。帶領著一個工作小組尋求融合電廠能商業化的設計師法羅‧納馬巴蒂（Farrokh Najmabadi），已經提出一個先進技術的融合電廠計畫：ARIES-AT。機器比ITER小，將發電十億瓦，提供每度（千瓦小時）五美分的電力，使它對石油具有競爭力。但納馬巴蒂即使樂觀，他也承認在世紀中期以前，融合發電還無法達到商業普及。



另一個商業性設計是示範電站（DEMO）融合反應爐。ITER是設計來發電五億瓦最少五百秒。而DEMO則設計來持續發電。它加上一個ITER所缺少的步驟。當融合進行時，一個額外的中子形成，它迅速由容器逃離。但是有可能在容器環繞特殊塗料（稱為毯子），特別設計來吸收整個中子的能量。隨後這個毯子熱起來。毯子內部的管子裝著的水沸騰。蒸汽送至鍋輪，推動葉片產生電力。

如果一切順利，這個DEMO將於二○三三年連線。它將比ITER大百分之十五。DEMO將製造出比它消耗的能量大二十五倍的能量。總數加起來，DEMO預期製造二十億瓦電力，使它可與傳統發電廠匹敵。如果DEMO發電廠成功了，它將導致此一科技的迅速商業化。



圖說：兩種融合類型。左邊是透過雷射壓縮一個高含量氫材料小粒子。右邊則是靠磁場壓縮含氫氣體。到了世紀中期，我們的世界可能從融合取得能源。（AFP/Getty Images）

但仍有許多不確定因素存在。ITER已有足夠的建築經費。但由於DEMO反應爐尚在計畫階段，進度的延後也在預期中。

融合科學家相信，他們終於到了轉捩點。經過數十年的誇大其詞和失敗，他們相信融合已在掌握之中。雖然目前有兩個設計（NIF和ITER）可能最終把融合電力帶到人們的起居空間，但是兩者都尚未能輸出商業用融合電力，因而仍留下難以預期的空間，例如桌上型融合和氣泡融合。

桌上型融合

由於事關重大，科學家們必需承認從完全不同的、未曾預期到的方向來解決問題的可能性也很重要。因為融合已經是一種充分界定的過程，在以大規模經費支持主流計畫之外，還有一些提案被提出來，其中也不無優點。特別是，其中有一些研究在未來有可能發展出桌上型融合。

在電影《回到未來》（Back to the Future）最後一幕，我們看到瘋狂的科學家布朗博士（Doc Brown）匆忙地為他的時間機器「德羅寧」（Delorean）收集燃料。不是以汽油加滿，而是到垃圾桶搜尋香蕉皮和垃圾，然後將所有的東西丟進一個小小的稱為「融合先生」（Mr.Fusion）的金屬容器。

再給一百年時間，有可能出現突破性的設計，將巨大的足球場大小的機器，縮小到一個如同電影中所見的咖啡機大小嗎？

桌上型融合的一個嚴肅的可能，被稱為聲致發光（Sonoluminescence）。這是用液泡突然塌縮去釋放極高的溫度。它有時也被稱為音波融合（sonic fusion）或液泡融合（bubble fusion）。早在數十年前，這種奇怪的作用就已經為人所知。一九三四年，科隆大學（University of Cologne）的科學家進行超音波和照相底片的實驗，希望加速顯影的過程。他們注意到，底片上的小點，來自由超音波產生的閃光造成顯影液中的氣泡。其後，納粹分子注意到，由螺旋槳逸出的液泡往往會發光，顯示液泡內部由於未知原因有高溫產生。

後來，人們發現，這些液泡會發亮是因為它們均勻地塌縮，因而壓縮液泡內的空氣，達到極高溫度。如同我們前面提及，熱融合會因不均勻的氫氣壓縮而失敗。不論是因為投射在燃料小點的雷射光束沒有協調好，還是氣體未能均勻壓縮。當液泡縮小時，分子的運動太快，以致液泡內的氣壓沿著液泡壁成為一致。原則上，如果有人能以此種完美的條件使液泡塌縮，他就能達成融合。

聲致發光實驗已經成功地製造出數十萬度的溫度。使用惰性氣體，可以提高由氣泡中散發的光線強度。但對於它能否達到足以產生核融合的高溫仍有爭議。爭議源自曾於橡樹嶺國家實驗室工作的魯西‧塔拉亞克漢（Rusi Taleyarkhan）的論文，他在二○○二年聲稱，能以音波融合設備完成融合。他宣布在實驗中偵測到中子，那是核子融合曾經進行的確證。但是，其他研究人員經過數年實驗，卻未能複製他的實驗。

另外還有一張變牌，就是發明電子式電視（但未獲頌揚）的發明家菲洛‧法恩斯沃斯（Philo Farnsworth），他所構想的融合機。兒童時代的法恩斯沃斯想像農夫犁田，一排接一排的樣子，最先得到電視的構想。他甚至在十四歲時以素描畫出它的原型。他是第一個把自己的構想轉換成

能夠完全以螢幕捉住移動圖像的電子裝置的人。不幸的是，他未能從他的劃時代發明贏得財富，卻陷入與RCA之間冗長又棘手的專利鬥爭。他的法律戰爭甚至使他發瘋，自動住進瘋人院。他在電視上的開拓性成果從此幾乎被人忘記。

到了晚年，他的注意力轉向「融合器」（Fusor），那是一種小型的桌上儀器，可以真的透過融合產生中子。它包含兩個球（小球在大球內），兩者都由金屬網格組成。外面的網格帶正電，內部網格帶負電，所以注入通過網格的質子被外層網格所排斥，而被吸引到內層的網格。然後質子又碰撞向中間的氫含量豐富的顆粒，由此創造出融合，噴出中子。

這個設計非常簡單，連高中生都能辦到李曲特、龐斯和弗萊許曼所辦不到的事：成功地產生中子。不過，這個儀器似乎未能產生可用能源。被加速的中子數量極少，因而由這個儀器輸出功率小於輸入功率，還不能作為能源。

事實上，用標準的原子核分裂加速器或粒子加速器也可能在桌上製造融合。原子核分裂加速器比融合器複雜，但它可用來使原子加速，讓它們向一個富含氫氣的目標猛擊，而產生融合。還是一樣，融合的質子數量很小，仍然派不上用場。所以，融合器和原子核分裂加速器都可達成融合，但效能不高，它們的光束太細，無法產生有用電力。

由於事關重大利益，無疑地，其他有企業精神的科學家和工程師，仍有機會把他們的地下室發明物變成下一代的超級發明。

遙遠未來（二○七○─二一○○）

磁力的時代

上一個世紀是電力的時代。因為電子很容易操縱，所以開啟了全新的科技，使收音機、電視、電腦、雷射、磁振造影機等等都成為可能。但本世紀的某個時候，物理學家可能會發現他們的聖杯：室溫超導體。這將引領大家進入全新的時代：磁力的時代。

想像一下駕駛一輛磁力汽車，懸浮於地面上，以時速數百英里前進，幾

乎不需燃料。再想像一下火車、甚至人們也能以磁力浮在空中旅行。

我們忘記了汽車所用的多數汽油，都是用來克服摩擦的阻力。原則上，從舊金山開車到紐約幾乎不需要能量。此行需要消耗數百美元汽油，主要的理由是必須克服輪子與地面和空氣的摩擦。但如果你能將舊金山到紐約的路，想辦法塗上一層冰，你可以在大部分的路上幾乎免費滑行。同樣地，我們的太空探索，只用數公升的油就能直衝冥王星，因為他們是在真空中滑行。同樣的情形，磁力汽車可以漂浮地面上；你只要在車上吹氣，它就開動了。

此一科技的關鍵是超導體。從一九一一年起就知道，水銀在絕對溫標（kelvin，符號為K）四度以上時，會失去所有的電阻。(譯注3)這意味著超導線不會損失電力，因為他們沒有阻力。（這是因為電子通過管線時與原子碰撞會損失能量。但接近絕對零度時，這些原子幾乎處於休息狀態，所以電子可以輕易地通過它們而不會失去能量。）

這些超導體有奇怪又神奇的性質，但一個嚴重的缺點是：你必須以液態氫將它們冷卻到接近絕對零度，而液態氫很昂貴。

因而，一九八六年IBM研究人員宣布發現新類別的超導體，不需被冷卻至那麼異樣的低溫時，物理學家們感到非常震撼。不像以前的材料（如水銀或鉛），這些超導體是陶瓷製品，以前被認為不像是超導體的候選材料，卻在絕對零度以上的九十二K就變成超導體。尷尬的是，它們在一個過去認為理論上不可能的溫度變成超導體。

目前，這種新陶瓷超導體的世界紀錄是絕對零度以上的一百三十八K。這點意義重大，因為液化氮（價格與牛奶一樣低）可以在七十七K形成，因而可以用來冷卻這些陶瓷。這個事實本身已經急遽降低超導體的成本。所以這些高溫超導體立即有了實用價值。

這些陶瓷超導體增強了物理學家的興趣。他們在正確的方向邁進了一大進步，但仍然美中不足。第一，雖然液化氮相對便宜，仍須藉助一些冷凍設備來降低氮的溫度。第二，這些陶瓷很難形塑成電線。第三，物理學家仍然對這些陶瓷的性質感到困惑。經過數十年研究，仍然無法確定它們如何作用。這些陶瓷的量子原理實在複雜，現在還是無解，所以無人知道它們為什麼變成超導體。物理學家還摸不著頭緒。諾貝爾獎正等著有進取心的人，能夠解釋這些高溫超導體的原理。

但是，每一個物理學家都知道，室溫超導體會有多巨大的影響。它能夠觸發另一次工業革命。室溫超導體不需任何冷凍設備，所以它們能夠創造巨大電力的永久磁場。

例如，如果電力在銅的迴路裡流動，由於銅線的阻力，它的能量在剎那間就開始耗損。不過，實驗已經顯示，超導迴路中的電力一次可以維持不變數年。實驗證據指出，超導線圈內的電流，生命週期為十萬年。有些理論主張，這種超導體內的電流最長可與宇宙本身同壽。

至少，這些超導體可以降低在高壓電纜內的浪費，因而，降低電力的成本。發電廠之所以必須與城市比鄰，理由之一就是傳輸線內的耗損。這也就是為什麼會危害人體健康的核子發電廠那麼接近城市，而風力發電不能設置於風力最強的地方。

高達百分之三十的由發電廠產生的電力會浪費於輸送途中。室溫超導電線將會改變這個現象，因而節省很多電力成本和污染。這也將對全球暖化產生巨大影響。因為全球產生的二氧化碳與能源的使用息息相關，也因為多數能源浪費於克服摩擦，磁力時代可以永遠降低能源消耗和二氧化碳的產生。

磁力汽車和火車

不需任何額外的能量輸入，室溫超導體就能夠產生超級磁力，可以使火車和汽車懸浮在空中。

這種力量，可以在實驗室內簡單地表演出來。我自己就為英國廣播公司電視節目和「科學頻道」做過數次。我們可以從科學用品供應公司訂購到一小片室溫超導陶瓷。它是一種大約一英吋大小、質地堅硬的灰色陶瓷。然後你要從乳製品設備供應商購買一些液化氮。將陶瓷放進塑膠碟子，然後將液化氮輕輕倒在上面。氮遇到陶瓷片就開始沸騰。等到氮停止沸騰以後，將一小片磁鐵放在陶瓷上方，奇蹟似地，磁鐵會浮在空中。如果你輕觸磁鐵，它就開始自行轉動。在那個小碟中，你可能已經看到未來的世界交通。

磁鐵懸浮的理由很簡單。磁力線無法穿透超導體。這就是所謂邁斯納效

應（Meissner effect）——當一個磁場用於超導體，一小股電流在表面形成並抵消它，所以磁場被超導體拒斥。當你將磁鐵放在陶瓷上方時，它的磁場線聚集在一起，因為它們無法通過陶瓷。這就創造了一個磁場線的緩衝。磁場線收縮在一起，因而將磁鐵推離陶瓷，使它浮起。

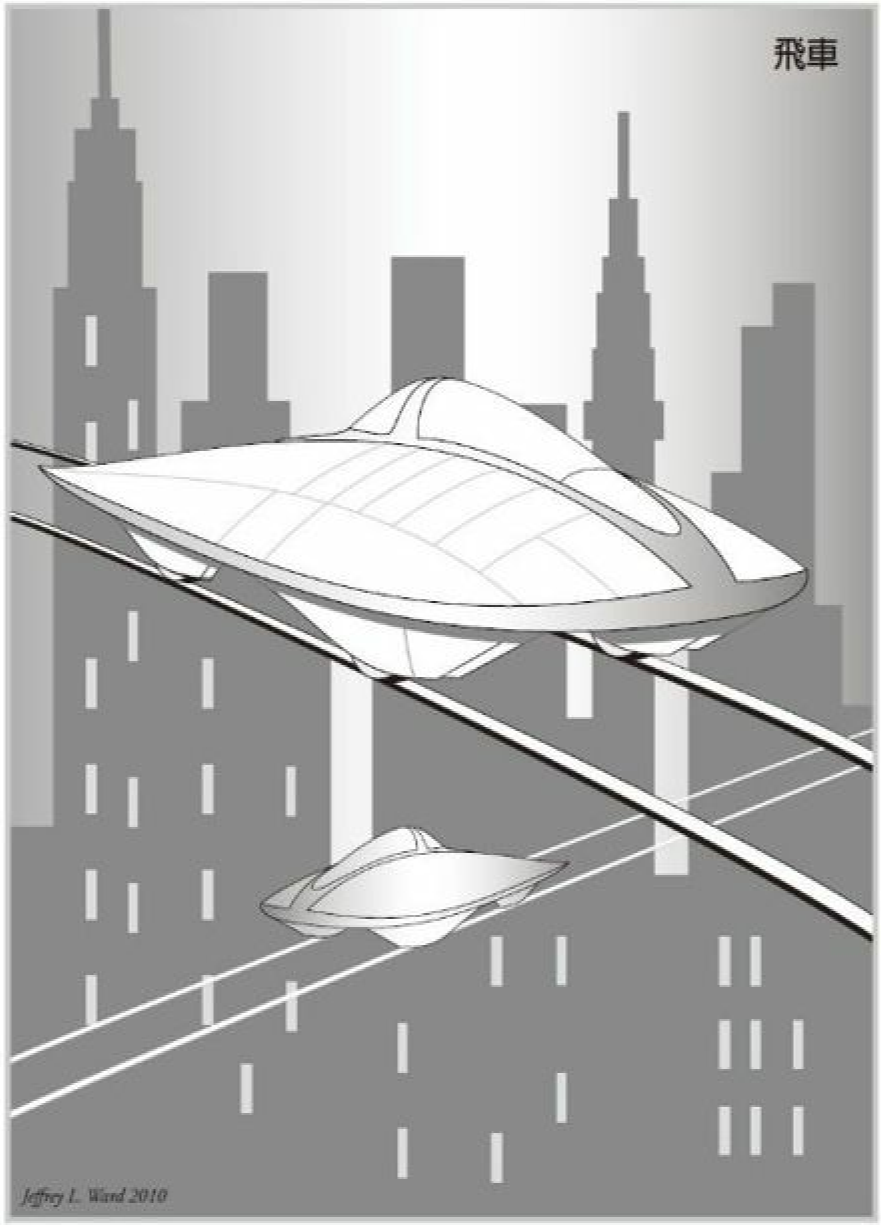
室溫超導體也可能引導超磁力時代的來臨。我們前面介紹過，磁振造影機極為有用，但需要很大的磁場。室溫超導體將容許科學家創造出廉價的磁場。它也會使未來磁振造影機的小型化成為可能。現在已經能使用非統一磁場，造出大約一英尺高的磁振造影機。有了室溫超導體，它們將可能縮小到一粒鈕扣的大小。

在電影《回到未來》第三集中，米高·福克斯（Michael J.Fox）踏在飄浮空中的滑板行進。電影首演後，玩具商店的電話被兒童塞爆，大家都想要購買飄浮滑板。可惜，飄浮滑板並不存在，但有了室溫超導體，它們將可能會出現。

磁浮火車和汽車

室溫超導體的一個簡單應用，是讓交通發生革命性變化，推出能夠浮在地面上方，因而移動時不發生摩擦的汽車和火車。

想像你正駕駛著一輛使用室溫超導體的汽車。路面不是用柏油而是用超導體鋪成。車上會有永久磁鐵或者它的超導體所產生的磁場。車子會飄浮。連壓縮的空氣都足以讓車子前進。一旦開動，如果路是平的，它會幾乎永遠滑行。只需一個電動引擎或壓縮空氣噴射機來克服空氣的摩擦（只對汽車表面產生阻力）。



圖說：室溫超導體有一天會帶來飛天汽車和火車。它們可懸浮於沒有摩擦力的軌道上或鋪設超導體的路面上。

即使沒有室溫超導體，已有數國製造出浮在一組有磁力的軌道的磁浮火車（magnetic levitating train,maglev）。由於磁鐵的北極排斥其他北極，磁力可以適當安排，讓火車底部含有磁性，因而懸浮於軌道之上。

德國、日本和中國是此一科技的領導者。磁浮火車甚至已創造了一些世界紀錄。第一列商業磁浮火車是低速短程穿梭火車，一九八四年行駛於伯明罕國際機場和伯明罕國際鐵路車站之間。磁浮火車的最高速度紀錄

是每小時三百六十一英里，二○○三年由日本的MLX01火車締造。（噴射飛機可以飛得更快，部分原因在於高空的空氣阻力較小。因為磁浮火車浮在空中，多數能量損失來自空氣摩擦。不過，如果磁浮火車運行於真空封閉空間內，它能以時速四千英里飛馳。）可惜的是，磁浮火車的經濟效益限制，使它們無法遍布世界。室溫超導體會徹底改變那個情況。這也能使美國的鐵路系統恢復活力，減少飛機在空中排放溫室效應瓦斯。據估計，有百分之二的溫室瓦斯來自噴射飛機引擎，所以磁浮火車可以將那個數字降低。

來自太空的能量

到了世紀末年，能源製造的另一可能之窗打開了：來自太空的能量。這是所謂「太空太陽能」（space solar power,SSP），涉及把數百顆太空衛星送到環繞地球的軌道，吸收來自太陽的輻射能，然後以光束將能量用微波輻射形式下傳到地球。這個衛星安放地點在地球上空二萬二千英里處，成為同步衛星（geostationary），以與地球自轉相同速度繞行。因為陽光在太空比地球表面強八倍，這就現出了真正的機會。

現在，SSP的主要障礙是成本——主要是用於發射這些太空收集器。直接由太空收集來自太陽的能量並不違反任何物理原理，但那是巨大的工程和經濟問題。但到了世紀末，降低太空旅行成本的新方法，可能會使衛星的安放變得很簡單，這點我們將在第六章提及。

第一個嚴肅擬定在太空建立太陽能基地的提案於一九六八年提出。國際太陽能學會會長彼德‧格拉瑟（Peter Glaser）建議，將現代城市大小的衛星送上空中，把電力射到地球。一九七九年，NASA的科學家認真研究這個提議，估計需要花費數千億美元，此一計畫因而胎死腹中。

但由於太空科技不斷的進步，一九九五年到二○○三年，NASA繼續以經費支持小規模的SSP研究。它的倡議者堅持說，SSP技術的成熟和經濟效益的提高，只是時間問題。曾在紐約大學服務的物理學家馬丁‧霍弗特（Martin Hoffert）說：「SSP提供真正永續性、全球性規模，又無排放物的電源。」

進行這樣雄心勃勃的計畫，要面對一些難以對付的問題——有些是真的，有些則純屬想像。某些人害怕這個計畫，因為由太空射下的能量光

束，有可能意外擊中人口密集區，造成大量傷亡。不過這種恐懼過分誇大。如果我們計算由太空擊中地球的實際輻射能，它會小到不致造成健康危險。所以，人們或許會想像有一顆流氓衛星，向地球發射死光，去把整個城市燒焦，但這只是好萊塢惡夢的題材。

科幻小說作者本·波瓦，二○○九年在《華盛頓郵報》（Washington Post）發表作品，描繪太陽能的驚人經濟。他估計，每一顆衛星將產生五十到一百億瓦電力，遠大於傳統燃煤發電廠，每度（千瓦小時）成本八至十美分。每個衛星將極巨大，大約一英里寬，花費大約十億美元，與核能發電廠的成本相當。

他要求現在的政府，創設一個實驗計畫，發射一個可以生產一千萬到一億瓦的衛星，以啟動此一科技。他假定，如果現在開始這個計畫，衛星可以在歐巴馬總統第二任結束時發射。

與這些評論相呼應的是日本政府宣布的一個重大創新計畫。二○○九年，日本經濟產業省宣布一個計畫，進行太空衛星發電系統可行性研究。三菱電機和其他日本公司將共同支持這個一百億美元的計畫，也許還要發射太陽能發電站進入太空，生產十億瓦電力。它將極為巨大（大約一·五平方英里），以太陽能電池覆蓋。

日本政府研究機構能源經濟研究所的健介兼清（Kensuke Kanekiyo）說：「看來有點像科幻卡通，但未來一世紀，當化石燃料逐步消失時，在太空生產太陽能電力，將是重要的替代能量來源。」

從這個具有雄心的計畫規模來看，日本政府很小心。一個研究團體將在未來四年研究這個計畫的科學和經濟可行性。如果這個團體給予綠燈，則日本經濟產業省和日本宇宙航空研究開發機構，計畫在二○一五年發射衛星，測試從太空以光束向下輸送能量。

主要的障礙可能不在科學方面，而是經濟問題。在東京的太空顧問公司神創（Excalibur）的吉田宏（Hiroshi Yoshida）警告說：「這些花費，應當降低至現在估計的百分之一。」但問題之一是，這些衛星在太空中必須高達二萬二千英里，比接近地球三百英里軌道的衛星高太多，所以傳輸的耗損可能很巨大。

但是主要的問題仍在於推進火箭的成本。這個瓶頸，與妨礙重返月球和

探測火星的瓶頸相同。

除非發射火箭的成本大幅降低，否則這個計畫將會胎死腹中。

樂觀地說，日本的計畫可以在世紀中期開始運作。不過，由於推進火箭的問題，這個計畫更可能必須等到世紀末，那時候新一代的火箭成本已經降低。如果太陽能衛星的主要問題是成本，那麼下一個問題就是：我們能否降低太空旅行成本，因而有可以到達其他星球的一天？

譯注1：美國核子管理委員會於二○一一年十二月批准西屋電氣公司最新版AP1000型核能反應器設計，並將進一步決定是否批准在美國東南部興建新的核電廠。

譯注2：據報導，二○一二年七月五日NIF已經測試成功。

譯注3：水的冰點為273.15K，沸點為373.15K。1K相當於攝氏1度。

第六章　太空旅行的未來——奔向眾星

> 我們在宇宙海洋的岸邊已經流連夠久，終於，我們做好準備要航向眾星了。
>
> ——卡爾‧薩根

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

> 太陽系以外的星球／木衛二——適居帶之外／LISA——大爆炸之前／載人太空任務／取消月球計畫／登陸小行星／登陸火星的衛星／回到月球／永久月球基地／月球上的水

世紀中期（二○三○—二○七○）

> 火星任務／將火星地球化／經濟效益？／太空旅行／百變王牌

遙遠未來（二○七○—二一○○）

> 太空電梯／星艦／核子火箭／衝壓式噴射融合引擎／反物質火箭／奈米船／出走地球？

神話中的眾神，在強有力的雙輪馬車上，漫遊通過奧林匹克山的天庭。古挪威諸神，在強大的維京船上，通過宇宙海洋，向神的居所阿斯加爾德（Asgard）前進。

同樣地，到了二一○○年，人類將到達太空探險新時代的邊緣：航向眾星。夜間所見的星星，像是在附近對人眨眼睛，實際上卻遙不可及。到了本世紀末，它們將是火箭專家聚焦的目標。

但是，建造星艦之路將是障礙重重。人類目前的處境就像是有一個人，

舉手捫星辰，卻雙足陷泥潭。一方面，在這個世紀裡，當我們送衛星去找出太空中與地球相同的行星、探測木星的衛星、甚至是拍攝到宇宙大爆炸初期的影像時，我們會見到一個機器人太空探險的新時代。但另一方面，載人到外太空探險，雖是好幾代夢想家和有遠見的人的嚮往，卻也是某些失望之源。

世紀初期（現在—二○三○）

太陽系以外的星球

太空計畫中最了不起的成就之一，就是外太空的機器人探測，大大地拓展了人類文明的眼界。

這些機器人的首要任務，將是搜尋太空中與地球條件類似的、可以庇護生命的行星——那是太空科學的聖杯。目前為止，以地面為基地的望遠鏡已經確認大約五百顆行星，在遙遠的星系軌道中繞行。每隔一兩個星期，就有一顆新的行星被發現。但是，最令人失望的是，我們的工具只能識別巨大的、與木星同樣大小的行星，而依照目前所知，那樣大的星球無法維持生命。

為了發現行星，天文學家搜尋星球軌道上的一些細小晃動。這些陌生的太陽系，有點像是一個旋轉的啞鈴，兩個球體互相繞著轉；其中一個代表恆星，可以在望遠鏡中清楚見到，而另一個代表木星大小的行星，環繞著中心的啞鈴，望遠鏡可以清楚看到它在晃動。這個方法，已經成功地識別出數百個太空中的巨大氣體，但它仍然過於粗略，難以偵測出較小的如地球般的行星。

以地球為基地的望遠鏡所發現的最小行星，是於二○一○年找到，比地球大了三至四倍。令人興奮的是，這個「超級地球」是第一個在它繞行的太陽軌道的適居帶中——例如，在會有液態水的適當距離。

有了二○○九年克卜勒任務（Kepler Mission）望遠鏡，和二○○六年「對流旋轉行星凌計畫」（又稱COROT計畫）衛星的發射，這方面的發展改變了。這些太空探索，是在尋找恆星光因為較小行星在前面通過而引起的微小波動。經過仔細掃描數千個星球，以尋求這種微小的波動，這些太空探索將可以偵測到也許數百顆類似地球的行星。一旦找到，這些

行星將被分析，以便知道它們有沒有液態水——這可能是太空中最珍貴的東西。液體水是通用的溶劑，第一個DNA出現於地面時的攪拌碗。如果在這些行星發現液態水的海洋，它可以改變我們對宇宙生命的了解。

新聞記者在追探醜聞時說：「跟著錢走。」但天文學家在探查太空中的生命時說：「跟著水走。」

輪到克卜勒衛星，將被其他更敏感的衛星取代——例如「類地行星搜尋者」（Terrestrial Planet Finder）。雖然發射日期數度延後，它仍然是延續克卜勒目標的最佳候選者。

「類地行星搜尋者」將以更進步的光學，在太空中尋找類似地球的孿生兄弟。第一，它將有比哈伯太空望遠鏡大四倍，和敏感一百倍的鏡頭。第二，它將有紅外線感應器，可以把來自恆星的強烈輻射消除到百萬分之一，因而揭露可能環繞著恆星的黯淡的行星。（它能辦到這點，是經由採取兩道來自星球的輻射波，然後仔細將它們結合，讓兩者互相抵消，因而除去不想要的星球的出現。）

所以，在不久的未來，我們將會有包含數千行星的百科全書，其中約有數百顆的大小和組成，將與地球相似。這些又會回過頭來引發科學家更多興趣，打算有一天要送出一個探索器到這些遙遠的行星。我們將會付出很大的努力，去看這些類地球的孿生兄弟，有沒有液體水的海洋，以及有沒有無線電波由有智能的生命發射出來。

木衛二——適居帶之外

在我們的太陽系之內，也有一個誘人的探索目標。數十年來，人們相信太陽系的生命僅能存在於環繞太陽的「適居帶」（Goldlocks zone）。這個區域不會過熱或過冷，生命可以維持。由於地球軌道與太陽的距離適中，它有了液態水的恩賜。液態水在太靠近太陽的行星（如水星）會沸騰，在離太陽太遠的行星（如木星）會凍結。由於液態水可能是DNA和蛋白質最初形成時的液體，長期以來，人們相信太陽系的生命只能在地球生存，或者加上火星。

但是天文學家們錯了。在「航海家」太空船航經木星的衛星後，顯然還有另一個地方可以繁衍生命：在木星的幾個衛星的表面冰層之下。木衛

二（Europa，伽利略於一六一○年發現的木星衛星之一）很快地引起天文學家的注意。雖然它的表面是永凍冰層，冰下卻有一個液體海洋。因為木衛二海洋遠比地球的海洋深，據估計，它的總容量有地球海洋容量的兩倍。

認識到太陽系中除了太陽外還有豐富的能源，不免讓人震驚。在冰下，木衛二的表面持續被潮汐力量加溫。當木衛二在木星周圍軌道翻滾時，行星巨大引力從不同方向壓縮衛星，在它深層核心創造摩擦。這個摩擦創造出熱量，熱量則將冰融化，因而創造了穩定的液態水海洋。

這個發現意味著，也許遠處的氣體巨人（天王星等）的那些衛星比行星本身更加有趣——這可能是詹姆斯‧卡麥隆（James Cameron）在拍攝二○○九年的電影《阿凡達》時，選擇一個木星大小的行星的衛星的理由之一。生命，一度被認為非常稀有，事實上可能在遠方那些巨大氣體行星之衛星的黑暗處繁殖。突然間，生命可能繁衍的地方的數量暴增了好幾倍。

作為這個令人矚目的發現所帶來的結果，就是「木衛二木星系統任務」（Europa Jupiter System Mission,EJSM）暫定於二○二○年發射。它被設計來到達木衛二軌道，並可能登陸。此外，科學家也夢想遣送較為精密的器械去探索木衛二。一個可能是「木衛二剪冰者任務」（Europa Ice Clipper Mision），用球體撞擊冰層表面，激起碎屑煙霧，然後由飛越的太空船穿透煙霧仔細分析碎屑。另一個更有雄心的計畫則是，把一個遙控潛水機器人送到冰層下。

對木衛二的興趣，也因這個海洋底下的新發展而更加振奮。在一九七○年代以前，多數科學家相信太陽是唯一能使生命成為可能的能源。但在一九七七年阿爾文（Alvin）載人深海研究潛水艇發現，新生命形式在沒人懷疑可能存在的地方有了繁殖的證據。它在探索加拉帕斯海溝（Galapagos Rife）時，發現使用來自火山口的熱能存活的巨大管狀蟲、蚌、甲殼綱動物、蛤及其他生命形式。只要有能源，就可能有生命；而這些海底火山口，已經在漆黑的海底提供新的能量來源。事實上，某些科學家已經提議，第一個DNA並非形成於地表海岸邊的潮間帶，而是形成於海底火山口。某些最原始的DNA形式（並且可能是最古老的）已經在海底發現。果真如此，可能木衛二的火山口可以提供能源，促使某些類似DNA的東西在地面出現。

我們只能猜測在木衛二冰層底下可能有的生命形式。如果的確存在，它們可能是使用聲納而非光線來導航的游水動物。所以，它們的宇宙觀，將會現受限於冰下的「天空」。

LISA——大爆炸之前

另一個可能造成科學知識大變化的太空衛星是「雷射干涉儀太空天線」（Laser Interferometer Space Antenna,LISA）及其繼任者。這個探索，可能做到不可能的事：揭開大爆炸以前發生的事。

現在，我們已能測量遠方的星系遠離我們的速率。這是由於「都卜勒頻移」——當星星向你接近或遠離你時，光就會扭曲。這給了我們宇宙膨脹的速率。然後我們「將錄影帶倒轉」，計算大爆炸發生的時間。這跟你分析一次爆炸散發的火紅碎片，來斷定爆炸發生的時間的方法非常類似。不過，令人洩氣的是，現在的太空衛星「威金森微波異向性探測器」（Wilkinson Microwave Anisotropy Probe,WMAP）只能向後窺視到大爆炸後少於四十萬年。因而我們的衛星只能告訴我們有一個大爆炸，而無法告訴我們，它如何爆炸、爆炸的程度、以及是什麼原因導致爆炸。

那就是LISA令人如此興奮的原因。LISA將測量一種全新類型的輻射：來自大爆炸當下的引力波。

每當一種新形式的輻射被人掌控，它會就改變我們的世界觀。當光學望遠鏡第一次被伽利略用來繪製行星與恆星地圖時，它們打開了天文科學。當無線電望遠鏡在二大世界大戰以後不久變得完善時，它們揭露了一個含有爆炸的星系和黑洞的宇宙。現在，第三代可以偵測引力波的望遠鏡，甚至可能打開更令人屏息以待的遠景——黑洞相碰撞、更高維度、甚至多重宇宙的世界。

LISA的發射時間暫定於二○一八至二○二○年。它包含三顆衛星，相距三百英里，以三束雷射光相連，形成一個巨大的三角形。它將是有史以來被送上軌道的最大的太空儀器。任何來自大爆炸而仍迴響於宇宙內的引力波，都會輕輕搖動衛星。這種干擾會改變雷射光束，其後感應器會記錄干擾的頻率和性質。如此，科學家應能得到大爆炸後一兆分之一秒的訊息。依據愛因斯坦的理論，時空像是編織物，可以彎曲和拉長。如果

有一個大干擾，例如黑洞相碰撞或大爆炸，則其波紋會形成，並在織物上行進。這些波紋（或引力波）由於太過細微，一般儀器無法偵測出來。但是，LISA夠敏感也夠大，可以偵測這些引力波導致的震動。

LISA不僅能偵測來自黑洞碰撞的輻射，它還可能窺視到一度被認為不可能的「前大爆炸時期」（pre-big bang era）。

現在，關於前大爆炸時期的理論，有數種來自「弦理論」——這正是我的專長。其中一種情境，我們的宇宙是某一種東西的不斷膨脹的大氣泡。我們住在這個大氣泡的表皮（我們就像蒼蠅黏在捕蠅紙上一般，被黏貼在上面）。但我們的氣泡宇宙與其他氣泡宇宙共存於大洋中（如同泡泡澡缸），形成一個多重宇宙的宇宙。偶爾，這些宇宙會相碰撞——即所謂「大圖示理論」（the big splat theory）；或它們會分裂成較小的氣泡，然後開始膨脹——即所謂「永恆的膨脹」（eternal inflation）。這些前大爆炸期的每一個理論，預測宇宙在最初的爆炸的一剎那間，如何釋出引力輻射。LISA可以測量大爆炸以後散發的引力輻射，並將它與弦理論的各種預測做比較。如此，LISA將可能排除或證實這些理論的一部分。

即使LISA的敏感性不足以執行此一精細的任務，也許下一代的LISA偵測器——如「大爆炸觀察者」（Big Bang Observer）——就可以勝任。

如果成功，這些太空探測將能回答好幾世紀以來都無法解釋的問題：宇宙從何而來？所以，在近期內，揭開大爆炸的起源可能是一個明確的目標。

載人太空任務

在機器人任務將會繼續為太空探索打開新的遠景的過程中，載人任務則將面對較大障礙。這是因為機器人任務，相對於載人任務，成本較低而又具有多功能；可以探索危險的環境；不需昂貴的保護生命設備；以及更重要的一點——不必回來。

回到一九六九年，好像我們的太空人已經準備好要探索太陽系了。尼爾·阿姆斯壯（Neil Armstrong）和巴茲·艾德林（Buzz Aldin）剛在月球漫步，人們已經在夢想著前往火星，甚至更遠。彷彿我們已經到了眾星

的門檻。人類的新世紀已經開始。

然後，夢想破滅了。

如同科幻小說家艾西莫夫所寫的，我們觸地得分，撿起橄欖球，然後回家了。今天，那老舊的土星推進火箭呆立於博物館中，或在廢物堆積場鏽蝕。一整個世代的頂尖火箭科學家任其消散了。太空競賽的動力也慢慢地消散了。今天，你只能在布滿灰塵的歷史書籍中，找到著名的月球漫步的參考資料。

發生了什麼事？許多事，包括越戰、水門事件等等。但是，當所有的紛擾沉寂之後，最後縮減為一個辭彙：成本。

我們有時候會忘記，太空旅行很昂貴，非常昂貴。要把一磅重的任何東西放到最接近地球的軌道上，就要花費一萬美元。你只要想像太空人約翰‧格林（John Glenn）的等身純金像的價值是多少，就能知道太空旅行的成本。到月球的話，每磅需要大約十萬美元。若是火星，每磅需要大約一百萬美元（約等於與你等重的鑽石）。

不過。所有這些都被與俄國競爭的興奮和戲劇性掩蓋住了。勇敢的太空人的壯麗太空絕技隱藏了太空旅行的真正成本，因為如果國家的榮譽面臨考驗，國家願意付出昂貴的代價。但即使是超級強權，也難以維持連續數十年的這種花費。

令人洩氣的是，牛頓寫下運動定律已超過三百年，但我們仍然被一個簡單的計算打敗。若要投擲物體到地球低空軌道，必須以時速一萬八千英里送出。若要將它送達太空深處，脫離地球引力場，則必須以時速二萬五千英里推動它。（而若要達到二萬五千英里這個魔術數字，我們必須應用牛頓第三運動定律：有作用力，就有等量的反作用力。這意味著，火箭可以快速前進，是因為它向相反的方向噴出熱氣體，這就跟你把氣球充氣然後放開，氣球會繞著房間飛一樣。）所以用牛頓定律來計算太空旅行的成本是很簡單的步驟。並無任何工程學或物理學法則限制我們去探索太陽系；問題卡在成本。

更糟的是，火箭必須為自己攜帶燃料，這又增加了它的重量。飛機可以就地取材，從機外的空中舀取氧氣，在它的引擎中燃燒。但因為太空中沒有空氣，火箭必須攜帶自己的氧和氫的儲存槽。

這一點不僅是使太空旅行昂貴的原因，也是我們沒有噴氣背包和飛天汽車的原因。科幻小說家（並非真正科學家）美化了我們背起噴氣背包飛去上班，和星期天坐進家庭用飛天汽車，一飛沖天去旅行的情景。許多人因此被未來學家搞得理想幻滅，因為這些預言永遠不會實現。（那就是為什麼我們會看到大量的文章和書籍，標上「我的噴氣背包在哪裡？」之類挖苦性的標題。）但只要速算一下就會有答案。噴氣背包早就存在；事實上，納粹在第二次世界大戰中還曾短暫用過。但是由於噴氣背包最常用的燃料過氧化氫很快就會用完，所以典型的噴氣背包飛行只能持續數分鐘。還有，使用直升機葉片的飛天汽車，要燃燒大量燃料，使他們的成本對普通的郊區通勤族而言，實在高得嚇人。

取消月球計畫

由於太空旅行成本過於龐大，目前，載人太空探索的未來游移不定。前總統喬治˙布希（George W.Bush）提出一個清楚而有雄心的太空計畫。第一，太空梭將於二○一○年除役，並於二○一五年由新的火箭系統「星座」（Constellation）取代。第二，太空人將在二○二○年返回月球，最終在那裡設置永久性有人駐紮的基地。第三，這將為後續載人前往火星的任務鋪路。

不過，此後有關太空旅行的經濟學有了重大改變，特別是經濟大衰退使得未來的太空任務經費枯竭。二○○九年奧古斯丁委員會（Augustine Commission）向歐巴馬總統提出的報告結論說，現有的經費水準，無法維持先前的計畫。歐巴馬總統認可了奧古斯丁報告，取消了太空梭和它的替代方案（這個替代方案將為重返月球奠基的）。在近期內，由於沒有火箭可以將我們的太空人送入太空，NASA不得不依靠俄國。同時，這也為私人公司提供了一個機會，可以創造繼續載人進入太空計畫所需的火箭。政策急速轉彎，NASA將不再為載人進入太空計畫製造火箭。此一計畫的支持者說，當私人企業接手以後，它會帶來太空旅行的新時代。批評者則說，這個計畫會將NASA降級為「一個哪裡都不去的機構」。

登陸小行星

奧古斯丁報告列出所謂「彈性路徑」，包含數個不需要太多火箭燃料的溫和目標。例如，就近到剛好漂浮過地球附近，或正要前往火星衛星的小行星。它指出，這種小行星可能並不在我們的星空圖上，而可能是近期內會被發現的一顆流浪的小行星。

奧古斯丁報告說，問題在於，登陸月球和回程所需的火箭燃料將會過分昂貴，尤其是登陸火星的回程。但因為小行星和火星的衛星引力場很低，這些任務將不需要那麼多燃料。這個報告也提及訪問拉格朗日點（Lagrange points）的可能性，這些地方是地球和月球引力在外太空互相抵消的地方。（這些地方可能充當太空垃圾堆，許多太陽系早期的古代碎片都匯集在那裡。所以，太空人到了那裡，可以發現有趣的岩石，其中有些是在地球和月球系統形成時期出現的。）

在小行星登陸的確是低成本任務，因為它的引力很弱。這也是小行星呈現不規則形狀（而非圓形）的原因。宇宙中，大的物體（如恆星、行星和衛星）都是圓的，因為引力平均拉住。任何行星，由於引力壓縮外殼，不規則的形狀都會逐漸消失。但是小行星的引力場很弱，以致於無法把它壓縮成球體。

一個可能的探索對象是小行星阿波菲斯（Apophis）。它因為將於二○二九年通過地球附近，而令人感到不安。阿波菲斯寬約一千英尺，大小約等於一個大型足球場。它通地球時，由於太接近，事實上會在某些衛星之下通過。取決於這顆小行星的軌道如何因為這次通過而扭曲，它也有可能於二○三六年回到地球，並有很微小的機會（十萬分之一）會撞到地球。如果發生了，撞擊力道等於十萬顆廣島原子彈，因而引起的風暴性大火、震波和劇烈的碎片，足以摧毀等同法國大小的地區。相對的，一個小很多的天體（約有一個公寓建築大小的小行星或彗星），於一九○八年撞擊西伯利亞的通古斯卡（Tunguska），威力約一千顆廣島原子彈。毀掉一千平方英里的森林，造成數千英里外感覺得到的震波。它也產生奇異的亮光，連亞洲和歐洲都看得到，因而倫敦的人還能在夜間閱讀報紙。

訪問阿波菲斯不致浪費NASA的預算，畢竟這顆小行星正在逼近地球。但是在它上面登陸會引起一個問題。因為它只有微弱的引力場，我們只能停靠在它旁邊，而非傳統觀念中的登陸。而且，這顆小行星可能不規地旋轉著，所以有必要在登陸前先做精確測量。測試這顆小行星有多堅

固是很有趣的事。有些人相信，一顆行星有可能是由一群岩石集體組成，而由一個微弱的引力場所維繫著。其他人相信它可能很堅固。有朝一日，如果我們必須用核子彈去摧毀一顆行星，則確定其一致性可能非常重要。一顆行星，有可能不是被分裂成粉狀，而是被分裂成幾大塊。果真如此，這些破片的威脅可能比原來更大。比較好的一個構想，可能是在它接近地球以前，將它輕輕推動，讓它離開。

登陸火星的衛星

雖然奧古斯丁報告並不支持載人前往火星的任務，但有一個誘人的可能是，送太空人訪問火星的衛星——火衛一（Phobos）和火衛二（Deimos）。這些衛星遠比地球的衛星月球要小，因而引力場很低。除了節省成本，在火星的衛星登陸還有一些優點：

第一、這些衛星可以用來當太空站。它們可以提供一種不須直接拜訪，而從空中分析行星的廉價方式。

第二、它們最後將可提供一個通往火星的便道。火衛一距離火星中心少於六千英里，所以只需數小時就能快速前往這個紅色行星做一次旅行。

第三、這些衛星可能有洞穴，可作為永久載人任務的基地，以免於流星和輻射的危害。特別是火衛一，側面有巨大的斯蒂克尼隕石坑（Stickney crater），顯示這個衛星有可能曾被流星擊中，並且幾乎變成碎片。但引力慢慢地將碎片組合成衛星。這次遠古的碰撞，可能留下很多洞穴和缺口。

回到月球

奧古斯丁報告也提及一個「月球第一」（Moon First）的計畫。我們將要回到月球，但只有在更多經費有著落以後才行——十年內最少需要三百億美元。由於可能性不大，這個月球計畫事實上已被取消，至少未來數年仍是如此。

這個已被取消的登月任務被稱為「星座計畫」，它包含數個主要部分。首先是推進火箭「戰神」（Ares），它是老舊的土星火箭於一九七○年

代被封存以後，美國第一個主要的推進火箭。在戰神上面是「獵戶座」（Orion）太空船，它可以攜帶六個太空人到太空站，或帶四個太空人到月球。另外還有「牽牛星」（Altair）登陸太空船，它將被實際用於登月。

舊的太空梭（放在推動火箭旁邊的穿梭火箭）有一些設計缺失，包括火箭有泡棉掉落的傾向。這一點造成「哥倫比亞」（Columbia）太空梭的災難性後果。它於二○○三年重返地球時爆炸，使得七名勇敢的太空人罹難。只因起飛時由推動器掉落的泡棉，擊中太空梭，在它側翼造成破洞；在回航時，熱氣穿過「哥倫比亞」的機殼，殺死了裡面的每一個人，並使太空梭解體。在「星座計畫」中，機員乘坐的機艙直接放在推動器上方，解決了此一問題。

「星座計畫」曾被稱媒體為「阿波羅計畫的類固醇」，因為它看來很像一九七○年代的登月火箭。戰神一號推動器有二百三十五英尺高，相對的土星五號火箭有三百六十三英尺高。本來打算用它來攜帶「獵戶座」太空船（取代舊的太空梭）進入太空。但若要攜帶很重的物品，NASA 將使用戰神五號火箭，它有三百八十一英尺高，可以攜帶二百零七噸物品進入太空。戰神五號火箭將是所有前往月球和火星的骨幹。（雖然戰神已經被取消，但已有人在討論，為了未來任務，應該去挽救這些計畫的一部分。）

永久月球基地

雖然「星座計畫」已經被歐巴馬總統取消，但他仍然對某些選擇保持開放。本來要帶太空人回到月球的「獵戶座」太空船，現在正被考慮來當作國際太空站的逃生艙。在未來的某些時候，當經濟復甦時，另一個政府可能願意再將月球列入其遠景，包括一個月球基地。

在月球表面建立一個永久存在的基地，要面臨諸多困難。首先是微隕石。由於月球沒有空氣，來自太空的岩石常會擊中它。我們只要看它的表面被隕石打得遍布凹痕（其中有些發生在數十億年前），就可以發現這一點。

當我還是加州大學柏克萊分校的研究生時，我親自看到了這個危險。一九七○年代初期由太空帶回的月球岩石，曾經在科學界激起熱情。我受

邀進入一個在顯微鏡下分析月球岩石的實驗室。我看到的岩石看起來很平常，因為月球的岩石外觀很像地球的岩石。但是在顯微鏡下，我被震住了。我看到岩石裡有一個小隕石洞，而小隕石洞內又有更小的洞。洞中有洞，小洞中還有更小的洞，我從未看到這樣的現象。我立刻認識到，沒有大氣層，即使是微小到顯微鏡才看得清的微塵粒，以時速四萬英里向你襲擊，也會很容易地將你殺死，或者至少穿透你的太空衣。（科學家了解這些微隕石所造成的重大傷害，是因為他們可以模擬這些影響。他們也在實驗室內製造了一支很長的槍管，可以發射金屬顆粒，來研究這些隕石的影響。）

一個可能的解決方式，就是建立一個地下月球基地。因為月球的古代火山活動，我們的太空人有機會找到一個通往月球內部深處的熔岩管（lava tube）——這些熔岩管是由古代的熔岩流動，蝕刻出洞穴般的結構和地下隧道。二○○九年，太空人發現一個熔岩管，約有一棟摩天大樓的大小，可能當作月球上的永久基地。

這個天然洞穴可以為太空人提供廉價的保護，對抗來自宇宙光和太陽閃焰的輻射。即使是紐約到洛杉磯的跨州飛行，也會使我們每小時暴露於一毫雷姆（millirem）的輻射（相當於照一次牙齒X光）。對我們的太空人，輻射可能太強，以致必須住在地下基地。沒有大氣層，一陣致命的太陽閃焰和宇宙光，可能造成太空人的立即性危險，導致早衰甚至癌症。

無重力狀態也是一個問題，特別是對長期的太空任務而言。我曾有機會訪問NASA在俄亥俄州克里夫蘭的訓練中心，太空人在那裡接受密集的測試。在我目睹的一個測試中，一個受測者被安全帶懸掛著，身體與地面平行。然後他開始在一個有垂直跑道的踏車上跑。透過在這個踏車上的跑步，NASA的科學家既能測試受測者的耐力，又能模擬無重力狀態。

當我與NASA的一個醫生談話時，我知道了無重力狀態的傷害性，比我以前的想像還要嚴重。一個醫生對我解釋說，在觀察了美蘇兩國太空人數十年承受的長期無重力生活之後，科學家現在相信身體會受到無重力影響而有顯著改變：肌肉、骨骼和循環系統發生退化。我們的身體生活於地球的引力場中，已有數百萬年的進化，當被長期置身於較弱引力場時，我們原本的生理進程就亂掉了。

在太空待過大約一年的俄國太空人，在回到地球時極度虛弱，以致只能爬行。即使他們在太空中天天運動，他們的肌肉仍會萎縮，骨骼中的鈣流失，循環系統也開始轉弱。某些太空人需要數個月才能由這個傷害中恢復，有些傷害則永遠存在。一趟到火星的旅程，可能需要兩年，可能耗盡太空人的元氣，以致於到達火星時無法執行任務。（一個解決辦法是轉動太空船，使它在艙內產生人造重力。這也與你能在頭上轉動一桶水而水不會溢出的理由相同。但這樣做的代價太高，因為必須有很重的機器在艙內轉動，而每一磅額外重量增加一萬美元成本。）

月球上的水

一個遊戲規則的改變者，就是月球上古代冰的發現。它可能是古代彗星撞擊的遺留。二○○九年，NASA的月球洞穴探索與感測衛星（LCROSS）的探測器和它的半人馬星座（Centaur）推進火箭撞擊月球的南極地區。它們以時速五千六百英里投擲，創造了一英里高的煙塵，和六十英尺寬的洞。電視觀眾很失望，因為這次撞擊並未如預期的創造出壯觀的爆炸，但它給我們豐富的科學資料。在那次撞擊中，大約發現了二十四加侖的水。然後，二○一○年，科學家又驚人地宣布說，有百分之五的碎片含有水，所以月球事實上比部分的撒哈拉大沙漠還要潮溼。

這點可能意義重大，因為它意味著，未來的太空人可以採集地下儲存的冰，作為火箭燃料（由水中提取氫）、呼吸（提取氧氣）、護罩（因為水可吸收輻射）以及淨化之後飲用等用途。所以，這個發現可以替未來的任何月球任務削減好幾億美元的經費。

這個發現也意味著，太空人有可能在月球上採集冰和礦物，以建造並供應永久性基地，離開地面生活。

世紀中期（二○三○-二○七○）

火星任務

二○一○年，歐巴馬總統前往佛羅里達宣布取消月球計畫時，卻維持了火星任務的前景。他支持為一個尚未公布細節的重型推進火箭提供經

費，使它未來有可能將空人送到月球以外。他認為他看得到那一天，也許就在二○三○年代中期，我們的太空人會漫步於火星。某些太空人（如艾德林）已經是歐巴馬計畫的熱情支持者，因為它將越過月球。艾德林曾經告訴我，美國已經去過月球，所以只有前往火星，才是真正的探險。

在太陽系所有的行星中，只有火星比較像地球，足以庇護生命。水星已被太陽烤焦，我們已知道它可能對生命極不友善。而那些氣體巨人（木星、土星、天王星、冥王星和海王星），都因太冷而無法支持生命。金星是地球的孿生兄弟，但失控的溫室效應已經造成一個地獄般的地方：溫度升高到華氏九百度，大氣中二氧化碳濃度比地球高一百倍，而且還有硫酸雨。走在金星表面，你會窒息，並破碎死亡，屍體會被熱氣燒成灰燼，然後被硫酸溶解。

另一方面，火星曾經跟地球一樣，是個有水的行星。它有消失已久的海洋和河床。今天，它是個冰凍的沙漠，沒有生物。也許微生物數十億年前曾經在那裡繁殖，或者可能在地底下的溫泉中活著。

一旦美國決定強力支持前往火星，還要在花二十至三十年才能真正完成任務。但是，到火星遠比到月球困難得多。相較於月球，火星代表著難度的量子大躍進。到月球只要花三天，而到火星卻要花六個月至一年。

在二○○九年七月，NASA的科學家，很難得地讓我們看到，真正的火星任務會是怎樣。太空人將會花六個月以上的時間飛到火星，然後花十八個月在火星上，回程再飛六個月。

總計大約一百五十萬磅的裝備需要送至火星，經費將超過太空站所需的一千億美元。為了節省食物和水，太空人必須在旅程中和火星上，淨化自己的排泄物，然後拿來當植物肥料。那裡沒有空氣、泥土或水，所有的東西都必須從地球帶去。幾乎不可能依靠火星陸地維生，因為那裡沒有氧氣、液化水、動物或植物。大氣中幾乎是純二氧化碳，氣壓只有地球的百分之一。太空衣萬一被劃破，將會迅速降壓致死。

由於任務過於複雜，必須分成幾個步驟。因為攜帶返航火箭燃料代價太高，另一個火箭將提前送至火星，攜帶燃料對太空船提供補給。（或者，如果可以從火星上的冰提取氫和氧，這也可作為火箭燃料。）

一旦上了火星，太空人可能要花好幾星期，去適應另一個行星的生活。火星的日夜週期與地球大致相仿（火星的一天是二十四·六小時），但一年則長兩倍。火星上的氣溫永遠不會高於冰的溶點。沙塵暴的威力極其兇猛。火星的沙和滑石粉的性質一致。沙塵席捲整個行星是常態。

將火星地球化

假設太空人在世紀中期造訪火星，並建立一個初期的火星前哨基地，太空人有可能考慮將火星地球化，也就是說，將這個行星的地形、氣候和空氣改造得跟地球相似直到足以供人類居住。改造最早將從二十一世紀晚期開始，但比較可能在二十二世紀初期。

科學家已經分析出數種火星地球化的方法。最簡單的方法，可能是將甲烷氣體，或其他溫室氣體注入大氣層。由於甲烷氣體是比二氧化碳更強勢的溫室氣體，它可能可以捕捉陽光，把火星的表面溫度提高到冰的溶點以上。除了甲烷以外，其他溫室氣體，如阿摩尼亞和氯氟化碳，也曾被分析過，可能作為地球化實驗之用。

一旦溫度開始升高，地下的永凍層可能開始解凍——那將是數十億年來的第一次。當永凍層開始解凍日，也就是河床開始滿水時。最後，當大氣濃度增高時，湖泊、甚至海洋都可能在火星形成。這將會釋放較多二氧化碳，引發正向回饋迴路。

二○○九年發現，火星表面有天然甲烷逸出，來源仍然是個謎。在地球上，多數甲烷氣體是有機物質腐化所造成。但在火星上，甲烷可能是地質變化的副產品。如果有人能夠發現甲烷的來源，就有可能增加它的產量，因而改變了氣候。

另一個可能，就是使彗星轉向，進入火星大氣層。如果我們能在夠遠的地方攔截一顆彗星，即使是用火箭輕輕一推、一個太空探測器的撞擊、甚或用太空船的引力去拉，都可能使它轉向。彗星主要成分就是冰，它們經常會行經太陽系。（例如哈雷彗星，含有一個約二十英里寬、樣子像花生的彗核，主要成分是冰和岩石。）當彗星逐漸接近火星表面時，它會遭遇大氣的摩擦，導致慢慢解體，以蒸汽的形式把水釋放到空中。

如果沒有合適的彗星可用，也可能將木星的冰衛星之一，或一個含冰的

小行星轉向，如可能含有百分之二十水分的穀神星（Ceres）。這些衛星或小行星將較難轉向，因為它們事實上是在穩定的軌道內。除了讓彗星、衛星或小行星在火星的軌道上慢慢凋謝，釋放出水氣，另一個選擇就是調動它們，去有效地影響火星的冰帽。火星的極地是由冰凍的二氧化碳造成，它們在夏天會消失，留下永久存在的冰。如果彗星、衛星或小行星撞擊冰帽，它們可以釋放極大量的熱量，使得乾冰蒸發。由於二氧化碳是溫室氣體，這將會使大氣更加濃密，幫忙加速火星的全球暖化。它也會創造出正向回饋迴路。從冰帽釋放的二氧化碳越多，火星就越溫暖，而溫暖的天氣又回過頭來釋放更多的二氧化碳。

另一個建議是在冰帽直接引爆核子彈。缺點是得到的液體水會含有輻射落塵。或者，我們可以嘗試建造一個融合反應爐，可以融化極地的冰帽。融合工廠以水為基本燃料，而火星上冰凍的水非常充足。

一旦火星氣溫上升到冰的融化點，就會形成許多水池，和特定藻類——在地球的南極生長繁茂的藻類或可移植於此。它們也許真的可以在大氣中二氧化碳含量百分之九十五的火星大肆繁殖。我們也可以透過基因改造，使它們在南極的成長速度最大化。這些水藻池，可以在好幾方面加速火星的地球化。第一，它們可以將二氧化碳轉變成氧。第二，它們會使火星的表面顏色變暗，因而吸收更多來自太陽的熱量。第三，因為它們不需外來刺激就能自行生長，所以用它來改變行星環境成本較低。第四，藻類可以栽培成為食物。最終這些藻池會產生泥土和適合植物的營養，而這些植物也會加速氧氣的製造。

科學家也在尋求，環繞火星建造太陽能衛星，將陽光折射進入火星的可能性。太陽能衛星本身就可能將火星表面加溫至高於冰點。一旦這一點實現，永凍層開始融化，這個行星就會自然地自行暖化。

經濟效益？

你千萬別幻想，殖民於月球和火星，能使我們立刻獲得巨大經濟利益。當哥倫布（Christopher Columbus）於一九四二年航行到新大陸時，他開啟了歷史性的意外之財的大門。很快地，征服者帶回劫掠自美洲原住民的大量黃金，而殖民者則送回對舊大陸有價值的原物料和農產。驚人財富所帶來的補償，遠遠高過遣送探險隊到新大陸的成本。

但是，在月球和火星的殖民完全不同。那裡沒有空氣、液態水或肥料，因而所有的東西都要由火箭帶去，所以樣樣都是異常昂貴。

還有，殖民於月球的軍事價值也不高，至少近期如此。這是因為由地球到月球來回，平均各須三天，但核子戰爭用洲際彈道飛彈只需作戰九十分鐘。一支在月球的太空機動部隊，遠水救不了近火，無法及時使戰爭改觀。因而，五角大廈並未編列任何經費支持武裝月球的緊急方案。

這意味著，如果我們在其他世界創立大規模的採礦作業，那將是為了太空殖民地的利益，而非為了地球。殖民者將會為自己提煉金屬和礦物，因為把它們送回地球的代價太高。唯有當我們有了自給自足的殖民地，可以自行運用這些原物料以後，在小行星帶採礦才有效益。而這個情況在世紀末（甚至更晚）以前不會發生。

太空旅行

那麼，什麼時候一般平民可以上太空？某些夢想家，像是去世不久的普林斯頓大學傑瑞德‧歐尼爾（Gerard O’Neill），夢想著一個像是巨大輪子的殖民地（其中有生活單位、淨化水工廠、空氣再循環單位等等），可以解決地球上人口過多的問題。但是在二十一世紀，以太空殖民來舒緩人口問題的構想，頂多只能說是美好的想像。對大多數人類而言，至少再一個世紀或更久之內，地球仍是我們唯一的家。

不過，有一種方法可以讓普通人真正上太空：作為一個觀光客。某些企業家，批評NASA官僚的巨額費用，認為他們可以用市場力量降低太空旅行的成本。伯特‧魯坦（Burt Rutan）和他的投資人於二○○四年十月四日贏得安薩里X獎（Ansari X Prize）一千萬美元。理由是他們在兩星期內兩度發射太空船一號（SpaceShipOne）到達地球上空六十二英里以上。太空船一號是第一艘由私人基金支持並成功進入太空的火箭推動太空船。發展成本大約二千五百萬美元，是由微軟的億萬富翁保羅‧艾倫（Paul Allen）幫忙認捐。

現在，魯坦期望以太空船二號開始測試，使商業太空飛行成為現實。維珍航空（Virgin Atlantic）的億萬富翁理查德‧布蘭森（Richard Branson），已經創立維珍銀河公司（Virgin Galactic），並於新墨西哥州設立太空港。他有一大串顧客名單，願意花費二十萬美元來實現飛往

太空的夢想。維珍銀河將是第一個提供商業太空飛行的主要公司。它已經訂購五艘太空船二號火箭。如果成功，這將會降低太空旅行成本，僅及過去的十分之一。

太空船二號運用數種方法來降低成本。魯坦不用巨大的推進火箭攜帶物品進入太空，而將太空船放在飛機上，所以它可以讓標準「呼吸空氣」的飛機背負著。如此，你只要消耗大氣中的氧氣就能達到相當的高度。然後距離地面大約十英里高時，太空船脫離飛機，發動它自己的火箭引擎。雖然太空船不能進入環繞地球的軌道運行，但它有足夠的燃料到達接近七十英里的高度，高於多數大氣的高度，所以乘客可以看到天空變成紫色，然後又變成黑色。它的引擎強大，足以達到三馬赫（Mach），或三倍音速（大約時速二千二百英里）。這當然不夠快，以致無法送火箭進入軌道（要時速一萬八千英里才行）。但那已能將你帶到大氣層的邊緣，以及外太空的起點。在近期的未來，到太空的一次旅行，也許花費不會比到非洲的一次狩獵旅行還貴。

不過如果要完全環繞地球，你顯然比須支付更多，才能做一次旅行。我有一次曾問微軟公司的億萬富翁查爾斯‧西蒙尼（Charles Simonyi），他花多少錢去買一張前往太空站的票。媒體估計，約為二千萬美元。他說，具體數字不便透露，但是他告訴我，媒體的報導大致差不多。他覺得那種經驗很美好，因而實際上去了兩次。所以，太空旅行即使在近期的未來，仍將是富人的領域。

無論如何，太空旅行於二○一○年九月打了一劑強心針。那時波音公司宣布，它也要介入這個行業，最早在二○一五年提供太空旅行的商業航班。這對歐巴馬總統將載人太空飛行計畫交給私人企業的決定，具有強化作用。波音計畫在佛羅里達州卡納維爾角的國際太空站進行發射。每一次包含四個船員，最多留下三個位子給太空旅客。不過，波音對私人太空冒險的籌資直率表明：納稅人必須支付多數的帳單。「現在是一個很不確定的市場。」波音公司商業空勤人員計畫經理約翰‧伊波恩（John EIbon）說：「如果我們必須獨資做這件事，而危險因素仍在，我們將難以結案。」

百變王牌

太空旅行的懲罰性成本，已經阻礙了商業和科學的進步，所以我們需要一種革命性的新設計。到了世紀中期，科學家和工程師將會使新的推進火箭技術趨近完美，把太空旅行的成本降下來。

物理學家弗里曼‧戴森，已經把將來會為一般人打開天堂之門的實驗性科技範圍，縮小至數種。這些擬議都有很高的危險性，卻都可以大幅縮減開支。第一是雷射推進引擎；在火箭末端點燃高能雷射光束，造成迷你型爆炸，以它的震波推動火箭向上。連續的快速發射雷射光束將水蒸發，推動火箭進入太空。此一雷射推進系統的最大優點，在於能源來自地面基地系統。雷射火箭完全不須燃料。（相對的，化學火箭為了把他們的燃料帶入太空，還要浪費很多自己的能量。）

雷射推進系統的科技曾經以實驗證明過，而第一個模型的成功測試則在一九九七年進行。紐約州壬色列理工學院的雷克‧米拉波（Leik Myrabo）創造了這種火箭的可操作原型，並稱它為光工藝科技（lightcraft technology）示範器。早期的一個設計直徑六英吋，重二磅。一個一萬瓦雷射產生系列的雷射爆發，氣爆創造出機關槍聲響，以二倍重力加速度（或每秒六十四英尺的平方）推動火箭。他已經能建造可在空中升高一百英尺的光工藝火箭——相當於一九三○年羅伯特‧葛達德的早期液體燃料火箭。

戴森夢想有這麼一天，雷射推進系統能以每磅五元的成本，將承載物送至地球軌道——那將是真正的太空旅行革命。他預見會有一個巨大的十億瓦雷射，可以將兩噸的火箭送至運行軌道。（那是標準核能發電廠的電力輸出。）火箭包含載運物和尾部的一箱水（以細孔慢慢漏水）。載運物和水箱各有一噸重。當雷射光束射擊火箭底部時，水在瞬息間蒸發，創造系列震波，推動火箭向太空。火箭達到重力加速度的三倍，在六分鐘內脫離地球引力的拉力。

由於火箭不必攜帶燃料，並無發生推動火箭爆炸的災難性危險。化學火箭雖然已經進入太空時代五十年，仍有百分之一的失敗率。而那些失敗實在令人觸目驚心——易燃的氫和氧燃料造成巨大的火球，碎片撒遍發射場。相對地，這個系統簡單、安全而且可以重複使用，只需很短的停機時間，且只用水和雷射。

更重要的是，這個系統最終會收回成本。如果每年能發射五十萬艘太空

船，所收的發射費將可付清作業和研發成本。不過，戴森知道這個夢想的實現還要等好幾十年。這些巨大雷射的基礎研究，所需的巨額經費遠超過大學的研究經費。除非有大公司或政府同意支付此一研究，雷射推進系統將不可能造成。

這是X獎所能著力之處。我曾與一九九六年創立X獎的彼德·迪曼蒂斯（Peter Diamandis）交談過，他相當了解化學火箭的局限性。他承認，即使是太空船二號，也面臨著用化學火箭的方法來脫離地球引力過於昂貴的問題。因而，未來的X獎會頒發給能夠以光能推動火箭的人。（但，不是用雷射光，而是類似電磁能的微波光作為來源。）X獎的名聲和巨額獎金的誘惑，將足以引發創業家和發明家的興趣，去創造非化學火箭（例如微波火箭）。

其他還有一些實驗性火箭設計，但都涉及不同的危險性。一種可能性是瓦斯槍，將要發射的物體從巨大的槍管中射出，有點像凡爾納的小說《從地球到月球》中的火箭。不過，凡爾納的火箭不可能真的飛起來，因為火藥不能將投擲物以時速二萬五千英里（脫離地球引力所需速度）射出。相對地，瓦斯槍使用在長管中的高壓瓦斯以高速發射載荷物。西雅圖華盛頓大學已故的亞伯拉罕·赫茲伯格（Abraham Hertzberg）製造了一個瓦斯槍原型，直經四英吋，長三十英尺。槍內的瓦斯是甲烷和空氣，加壓至氣壓的二十五倍。當瓦斯被引燃，載荷物順著爆炸的方向以驚人的三萬倍重力加速度飛出——這種加速度大到可以夷平多數金屬物體。

赫茲伯格已經證實這種瓦斯槍有效。但要投擲載荷物進入外太空，這個管子必須更長（大約七百五十英尺），而且沿著彈道，必須使用不同的瓦斯。最多必須分五個階段使用不同瓦斯，以推動載荷物脫離地球引力。

瓦斯槍的成本甚至可能比雷射推進系統更低廉。不過，若要用這種方法送人升空，那就危險得多；只有承受得了強力加速的堅固載荷物才能被投擲。

第三種實驗性設計是離心機——如同繩上的球，在一個圓圈中旋轉載荷物，然後將它投向空中。

德里克·提德曼（Derek Tidman）建造了一個原型。他做了一個桌上型的

模型，可以在數秒內以每秒三百英尺的速度將物體拋去。這個離心機包含一個甜甜圈形狀的管子（圓圈直經三英尺），管子本身直徑一英吋，並含有一個小金屬球。當球環繞管子時，有個小馬達推動球，使它加速。

一個真實可以投擲載荷物進入外太空的離心機，將大得多——直徑數百或數千英尺，可以把能量注入球體，直到它達到每秒七里。球體將以一千倍重力加速度離開離心機（仍然足以夷平大多數物體）。仍有許多技術問題尚待解決，其中最重要的是球體與管子的摩擦（必須予以最小化）。

這三種設計都需要好幾十年才能達到完善，但唯有政府或私人企業願意提供研究經費。否則，這些原型將停留在製圖板上。

遙遠未來（二○七○–二一○○）

太空電梯

到了這個世紀末，奈米科技甚至會使傳說中的太空電梯成為可能。就像在童話故事「傑克和魔豆」中，我們將可以爬上雲端，甚至更高。我們將進入一個電梯，按下按鈕，然後沿著好幾千英里長的碳奈米管上升。這也將顛覆太空旅行的價格。

回到一八九五年，俄國物理學家康士坦丁‧習歐科夫斯基（Konstantin Tsiokovsky）受到當時最高建築艾菲爾鐵塔的啟發。他問自己一個簡單的問題：為什麼我們不能建造一個通往太空的艾菲爾鐵塔？他計算出，如果它夠高，就會被物理法則支撐著，不會倒下。他稱之為「天空的城堡」（celestial castle）。

想像一顆繫在線上的球。把球旋轉，離心力足以使球不墜落。同樣地，如果纜線夠長，則離心力將避免它掉落地面。地球的轉動將足以維持纜線於空中。一旦這個纜線延伸至天際，任何沿著這條纜線行進的電梯，將能進入太空。

在紙面上作業，這個花招似乎行得通。但不幸地，當運用牛頓運動定律去計算這條纜線的張力時，你會發現它比鋼鐵的張力還要大：纜線會突

然折斷，使太空電梯成為不可能。

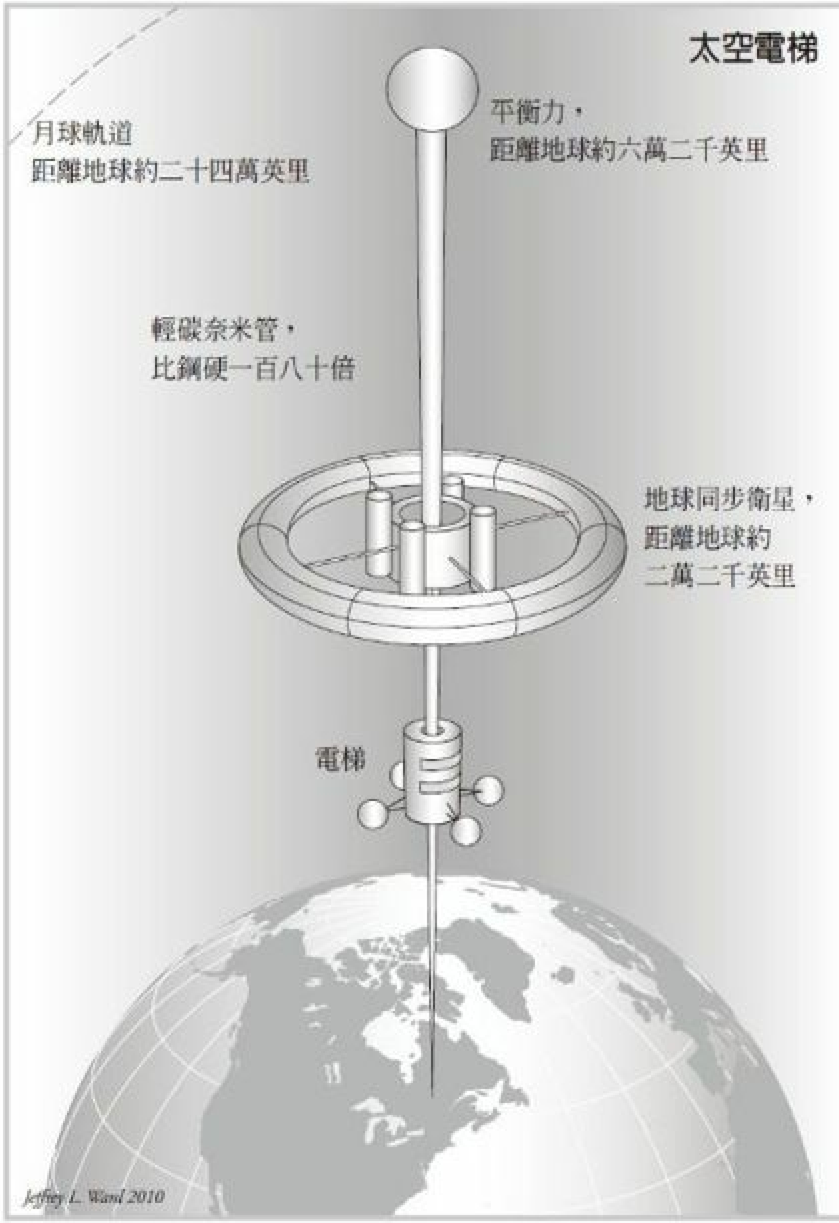
過去數十年來，太空電梯的構想雖有斷續修正，但都因這個理由而被否決。一九五七年，俄國科學家尤里·阿特蘇塔諾夫（Yuri Artsutanov）提出一個改進，建議太空電梯之興建由上而下進行，取代由下而上的原始構想。也就是先將一艘太空船送至軌道，然後將一條纜線垂下，固定於地面。還有，科幻小說家也使太空電梯的構想大眾化，其中包括亞瑟·克拉克（Arthur C.Clarke）的《天堂之泉》（The Fountains of Paradise）和羅伯特·海萊因（Robert Heinlein）一九八二年的《星期五》（Friday）。

碳奈米管有助於修正此一構想。我們已經看到這些奈米管在所有的物質中有最強的張力。它們比鋼鐵還堅固，強到足以支撐太空電梯的張力。

但問題就在如何創造出五萬英里長的純奈米管。這是一個很大的障礙，因為目前為止科學家只能造出少數幾公分的純奈米管。若用數十億條碳奈米管編織而成奈米片或纜線有其可能，但這些碳奈米管並不純粹。它們只是纖維被壓在一起編織而成。

二○○九年，萊斯大學的科學家宣布一項突破。他們的纖維是複合的，並不純粹（也就是說，它們不適合用於太空電梯），但是他們的方法可做多方面應用，足以製造任何長度的碳奈米管。經過嘗試錯誤，他們發現這些奈米管可以溶於氯磺酸溶劑，然後以一個類似蓮蓬頭的噴嘴射出。這個方法可以製造出五十微米寬、數百公尺長的碳奈米管。

商業應用之一將是輸電纜，因為碳奈米管的導電性優於銅，也較輕、較不易故障。萊斯大學工程學教授馬蒂奧·帕斯奎里（Matteo Pasquali）說：「若是作為傳輸線，則需要好幾噸，現在還沒有辦法做出那麼多。我們還需要一個奇蹟。」



圖說：太空電梯將來可能大幅降低太空旅行費用。太空電梯的關鍵可能是奈米科技。

雖然這些纜線不夠純粹，不夠格用於太空電梯，但這個研究顯示有那麼一天，我們將能生產出純碳奈米管纜線，堅固得足以將我們帶入太空。

假定未來我們能夠造出夠長的奈米管纜線，還是會碰到實際問題。例如，纜線將延伸至遠超過多數衛星的軌道，所以那些低於纜線最高點的衛星，在繞行地球很多圈以後，總有一天會碰到纜線，釀成撞擊。由於衛星通常以時速一萬八千英里繞行，一次碰撞就可能就大災難。這意味

著，電梯必須安裝特殊火箭，在衛星通過前，將纜線移開。

另一個問題是狂暴的氣候，例如颱風、暴風雨和強風。太空電梯必須固定在地面，也許是一艘航空母艦，或是座落於太平洋的探油平台。它必須能夠移動，以避免強有力的自然傷害。

在電梯中，也要有一個緊急按鈕和逃生艙，以便萬一纜線斷裂時可用。如果纜線被折斷了，電梯必須能夠滑動，或以降落傘降落地面，來解救旅客。

為了提供太空研究的新動力，NASA已經對數個競賽提供獎勵。NASA的太空電梯競賽總獎金為兩百萬美元。依據它所訂規則，若要贏得「光束功率挑戰」（Beam Power Challenge），必須創造一種重量低於五十公斤的裝備，能以每秒兩公尺的速度攀爬繩索一公里長。這個挑戰的困難在於這個裝置不能有燃料、電池或電線。能源必須由外界以光束傳送。

我有機會親自見到許多工程師，以熱誠和活力致力於太空電梯，並夢想著能贏得此獎。我飛到西雅圖去，與一個稱為「雷射驅動」（LaserMotive）的團體中富有企業精神的年輕工程師會面。他們聽到NASA競賽誘人的召喚，開始創造可能有朝一日會啟動太空電梯的原型。

我進入一個大倉庫——那裡是他們租來測試構想的地方。在倉庫的一側，我看到可以射出強大光能量的雷射機。在倉庫的另一側，我看到他們的太空電梯。它是一個大約三英尺寬、且有一面大鏡子的盒子，雷射光束將會射到鏡子上，然後被轉向一系列太陽能電池。太陽能電池會將雷射能轉為電力。電力將發動一個馬達，於是電梯將會在一條短的纜線緩緩向上爬。如此，不需電纜垂懸在太空電梯上以提供電力。你只需在地球上將雷射光投向電梯，電梯就會在纜線上自行攀爬。

由於雷射實在太強大，我們都必需佩戴護目鏡。經過無數次嘗試，他們終於能夠發射雷射，並使裝置在纜線爬行。至少在理論上，太空電梯的某一方面問題已獲解決。

剛開始，這個任務實在困難，以致無人獲獎。但是到了二○○九年，「雷射驅動」贏取了獎項。競賽於加州莫哈威沙漠的愛德華空軍基地舉

行。一架直升機飛過沙漠，掛著一條纜線。「雷射驅動」團隊能夠讓他們的電梯在四天內攀爬纜線四次，表現最佳的一次是三分四十八秒。因此，我所看見的這些年輕工程師的辛勤工作，終於獲得了回報。

星艦

即使有近年的載人太空任務經費上的挫折，到了世紀結束時，太空人仍可能已經在火星設立前哨站，在小行星帶上也可能有。然後，他們會將下一個目標設定在一個真正的恆星。雖然，星際探測在今日顯得完全無望，但在一百年內，它會成真。

第一個挑戰是找到一個新的推進系統。如果用傳統的化學火箭，要花大約七萬年才能到達最接近的恆星。例如，一九七七年發射的兩艘「旅行者」太空船，已經創下了送出的物體到達太空深處的世界紀錄。它們現在大約深入太空一百億英里，但這個距離只是前往眾星的微不足道的一部分。

有數種針對星際太空船的設計和推動系統已被提出：

☆太陽帆

☆核子火箭

☆衝壓式噴射融合引擎

☆奈米船

當我訪問俄亥俄州克里夫蘭的NASA梅花溪站時，有機會見到一位太陽帆的夢想家。在那兒，工程師建造了世界最大的真空室以測試太空衛星。這個真空室是一個真正的大洞穴：它有一百英尺寬，一百二十二英尺長，足以容納數層高的公寓建築，大到可以在真空的空間中測試衛星和火箭。走進室內，我被這個計畫的龐大震攝住了，許多美國歷史性衛星、探測器及火箭都在此測試過，能夠與它們走過同樣的真空室，我感到非常光榮。

在那裡，我會見了NASA科學家，也是太陽帆的領先倡議者之一的萊斯·

強森（Les Johnson）。他告訴我，早在童年時代讀了科幻小說，他就夢想著要建造一艘可以到達其他星球的火箭。強森甚至寫了一本有關太陽帆的基礎教科書。雖然認為它可以在數十年內完成，但他也必需向現實屈服，接受真正的太空船可能在他有生之年無法實現。強森認識到，如同中世紀的石匠建造偉大的天主教堂，可能需要好幾代人的時間，才能建成可以到達眾星的太空船。

太陽帆的優點在於，陽光雖無實質，卻有動能，因而可以施加壓力。雖然來自陽光的壓力極為微弱（小到我們的手感受不到），但如果帆夠大，而我們又等得夠久，它足以推動星艦航行。（太陽光在太空中的強度，八倍於在地球表面。）

強森告訴我，他的目標是製造一個巨大的太陽帆（由很薄卻堅韌的塑膠製成）。這個帆將有數英里寬，而且在外太空建造。一旦組合完成，它會繞日緩緩旋轉，在前進過程，獲得越來越多的動能。經過繞日數年，這個帆將會旋轉脫離太陽系，往其他星球進發。他告訴我，這樣一個太陽帆能夠以百分之○‧一光速推動探測器，可能在四百年內到達最接近的星球。

為了降低到達星球所需時間，強森尋求各種方法來增加太陽帆的推動力。一個可能是：在一個衛星上面放一個巨大的雷射電池。雷射光束將擊中太陽帆，使它在航向星球途中增加動能。

以太陽帆驅動的太空船有一個問題，就是它很難停止和回頭，因為光是由太陽向外移動。一個可能是：將帆的方向翻轉，運用目標星球的光壓力來使太空船減速。另一個可能是：繞著遠方星球，用星球的引力創造彈弓效應來返航。還有另一種可能，就是在一個衛星登陸，建造雷射電池，然後以星球的光和來自衛星的雷射光束回航。

雖然強森有星球的夢想，他也懂得以謙卑之心面對現實。一九三三年，俄國人從和平號太空站（Mir space station）鋪設了一個六十英尺的聚酯薄膜（或塑膠片）反射器，但那只是實驗性鋪設。第二次嘗試失敗了。二○○四年，日本成功地發射兩面太陽帆原型，但它仍然是測試性部署，不是推進器。二○○五年，行星學會（Planetary Society）、宇宙工作室（Cosmos Studios）和俄國科學院共同進行一個極具企圖心的嘗試，去部署名叫「宇宙一號」（Cosmos 1）的真正太陽帆。它由一艘俄

國潛艇發射。但因「波浪」（Volna）火箭發射失誤而未能進入軌道。到了二○○八年NASA的一個團隊嘗試發射命名為「奈米帆D」（Nanosail-D）的太陽帆，但是當「獵鷹」（Falcon）火箭失敗時，它也失蹤了。

終於，在二○一○年五月，日本宇宙航空研究開發機構（JAXA）成功地發射了伊卡洛斯（IKAROS），(譯注1)這是第一個使用太陽帆科技在星際空間運作的太空船。它是一個方形帆，二十公尺見方，使用太陽帆推動器航向金星。日本人希望最後能夠送使用太陽帆推動器的太空船前往木星。

核子火箭

科學家也曾考慮用核子能推動太空船。這個想法始於一九五三年，原子能委員會開始嚴肅看待攜帶原子反應爐的火箭，並由「羅浮計畫」（Project Rover）起頭。在一九五○和一九六○年代，核子火箭的實驗基本上都以失敗告終。它們往往不穩定，也太過複雜，以致無法適當控制。還有，一個普通的分裂反應爐，顯然無法製造足夠的能量，來驅動一艘星艦。一座典型的發電廠，生產大約十億瓦電力，不足以到達其他星球。

但在一九五○年代，科學家提議使用原子彈和氫彈（而非反應爐）來推動星艦。例如「獵戶座計畫」，提議以一連串的原子彈的強大爆炸產生的核脈衝推動火箭。星艦在背後丟下一系列原子彈，創造出系列X光衝擊波。於是這個震動波就會推動星艦前進。

一九五九年，通用原子能公司（General Atomics）的物理學家估計，一個先進的獵戶版將有八百萬噸重，直經四百公尺，由一千顆氫彈提供動力。

獵戶座計畫的一個熱心支持者就是弗里曼·戴森。他說：「對我而言，獵戶座計畫的意義，就是為生命開啟整個太陽系。它能改變歷史。」它也是丟棄原子彈的方便方式。「一次旅程，就會丟棄二千個原子彈。」他說。

不過，一九六三年的核子禁試條約殺死了獵戶座計畫——該約禁止地面

以上的核子武器測試。沒有測試，物理學家就無法改善獵戶相關設計，於是構想胎死腹中。

衝壓式噴射融合引擎

但是在一九六○年代，羅伯特‧巴薩德（Robert W.Bussard）還有另一個核子火箭的擬議。他夢想著一個類似普通噴射引擎的融合引擎。一個衝壓式噴射引擎，吸取前面的空氣，將它與內部的燃料混合。引燃空氣與燃料混合物，發生的化學爆炸創造了衝刺力。衝壓式噴射融合引擎以氫氣（氫在星際空間到處都有）取代空氣。氫氣將被電子和磁場壓縮和加熱，直到氫氣融合成氦氣，在過程中釋放巨大能量。這將會產生一次爆炸，由此產生衝力。由於太空深處的氫氣取之不盡，相信衝壓式噴射融合引擎將可永遠運作下去。

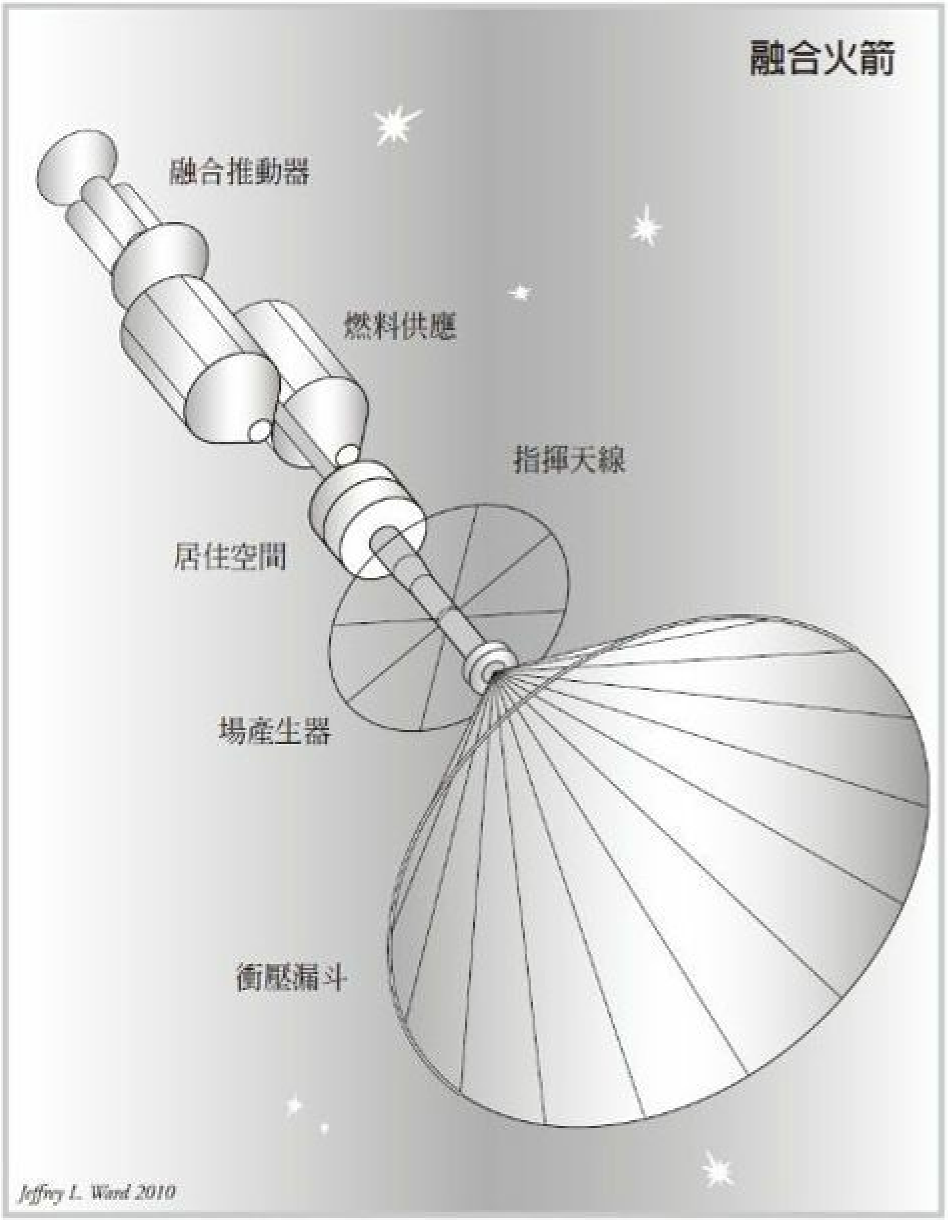
衝壓式噴射融合引擎的設計有點像冰淇淋筒。漏斗捉住氫氣，將它送往引擎，在那裡被加熱並與其他氫原子融合。巴薩德計算出，如果一個一千噸的衝壓式噴射引擎可以維持每秒三十二英尺平方的加速度（或地球上所感受的引力），那麼它只需一年就能達到百分之七十七光速。由於衝壓式噴射融合引擎可以無限期前進，它理論上可以脫離我們的星系，在二十三年內（依火箭船內的太空人的測量）到達距離地球二百萬光年的仙女星系（Andromeda galaxy）——依據愛因斯坦的相對論，在加速火箭中，時間會減緩，所以地上也許已經過了數百萬年，而太空人只老了二十三歲。

衝壓式噴射融合引擎面對著一些問題。第一，由於星際空間主要以質子存在，融合引擎必須燃燒純氫燃料——它無法產出很多能量。融合氫的方法很多。在地球上傾向融合重氫和氚（即超重氫），它們產生較多能量。但在外太空，氫是以單一質子的形式被發現，因而噴氣引擎只能將質子與質子融合，產生的能量不如重氫與氚的融合。不過，巴薩德表明，如果我們加上一些碳來修改燃料的混合體，碳將可扮演觸媒的角色，創造巨大能量，足以推動星艦。

第二，漏斗必須很巨大（大約一百六十公里）才能蒐集足夠的氫，所以它必須在太空中組裝。

另有一個尚待解決的問題。一九八五年，工程師羅伯特‧祖比林（Robert

Zubrin）和達納‧安德魯斯（Dana Andrews）證明，衝壓式噴射融合引擎所遇拉力，會大到足以阻止它加速到接近光速。這種拉力是星艦移動進入氫原子場中所遭遇的阻力。不過，它們的計算很大的一部分是基於某些特定的假設，不一定適用於未來設計的衝壓式噴射引擎。



圖說：由於衝壓式噴射融合引擎由星際太空舀取氫，它理論上可以永遠運作。

現在，除非找到更理想的融合程序（以及太空中離子的拉力效應），衝壓式噴射融合引擎的前景尚難定論。但如果這些工程問題可以克服，則

衝壓式噴射融合火箭肯定會在最佳選擇名單中。

反物質火箭

另一種截然不同的可能，就是應用宇宙中最大能量來源——反物質——來推動太空船。反物質是物質的反面，有相反的電荷；例如，電子有負電荷，但反物質電子（正電子）則有正電荷。它碰到平常的物質就會使它消失。事實上，一湯匙的反物質，就有足夠的能量可以摧毀整個紐約都會區。

由於反物質如此強有力，所以丹‧布朗（Dan Brown）在他的小說《天使與魔鬼》（Angels and Demons）中，有一個壞蛋使用由瑞士日內瓦之外的歐洲核子研究組織（CERN）偷來的反物質製造了一個炸彈，要炸毀梵諦岡。不像氫彈（只有百分之一的效能），一個反物質炸彈有百分之百的效能，經由愛因斯坦的公式$E=mc^2$，將物質轉變成能量。

原則上，反物質可以成為太空船的理想火箭燃料。賓州大學的吉拉德‧史密斯（Gerald Smith）估計，四毫克的反物質，就可以帶我們到火星。可能一百毫克就能帶我們到鄰近的恆星。以同樣重量做比較，反物質釋放的能量比火箭燃料多十億倍。一個反物質引擎外觀將極簡單。你只要滴下穩定的反物質粒子流進入火箭的封閉空間，在其中與普通物質結合，就會造成巨大的爆炸。爆炸的氣體從密閉空間一端射出，因而產生衝力。

我們仍然離開夢想極為遙遠。目前，物理學家已經能夠創造出反電子和反質子，以及反氫原子，而反電子則繞著反質子運轉。這是完成於CERN和芝加哥附近的費米國家加速機實驗室（Fermi National Accelerator Laboratory）的強子對撞器（Tevatron，世界第二大粒子加速器，僅次於CERN的大強子對撞機）。兩個實驗室的物理學家將一束高能的粒子擲向目標，創造蓮蓬灑水般的碎片，其中就含有反物質。強大的磁力被用來將反物質與一般物質分開。然後這些反物質被減速，並讓反電子與它們混合，創造出反氫原子。

有一個人對反物質有過長期的深思，他就是費米實驗室的物理學家迪夫‧麥金尼斯（Dave McGinnis）。他站在強子對撞機旁，對我解釋反物

質那令人氣餒的經濟學。他強調，唯一已知的製造穩定數量反物質的方法，就是使用類如強子對撞機的粒子加速器。這些機器極端昂貴，而且只能產生微量的反物質。例如，二○○四年，CERN的粒子加速器，花了兩千萬美元才製造出數個兆分之一克的反物質。以那個速度，必須讓整個地球經濟破產，才能製造足夠的可以推動一艘星艦的反物質。它們確實在物理法則之內，但在近期的未來，製造的代價高得令人卻步。

反物質過於昂貴的理由之一，是因為需要貴得離譜的粒子加速器來製造它。不過，這些粒子加速器有多方面用途，主要是為了製造特異的次原子粒子，不是為了較平常的反物質粒子而設計。我們可以信，如果專門為大量製造反物質，而設計一種新類型的粒子加速器，成本將會顯著降低。因而透過大量製造的這類機器，就可能製造出相當大量的反物質。NASA的哈樂德‧蓋瑞希（Harold Gerrish）相信，反物質的成本，最終每百萬分之一微克可以降至五千美元。

另一個可能性，可能存在於發現一個外太空的反物質隕石。如果這種物體被發現，它可以為星艦提供足夠的動力。事實上，歐洲衛星潘密拉（PAMELA，即Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-Nuclei Astrophysics，反物質物質的探測和輕原子核天體物理的有效載荷）已於二○○六年發射，以專門尋找外太空自然生成的反物質。

如果在太空發現大量的反物質，我們可以想像，未來將使用巨大的電磁網去蒐集它。

所以，雖然反物質星際火箭肯定合於物理法則，若要降低成本可能要等到本世紀末年。但如果這點可以辦到，則反物質火箭將會在任何設計星艦者的少數選擇名單中。

奈米船

當我們被《星際大戰》和《星艦迷航記》中的特殊效果搞得目眩神搖之際，我們立刻會想像到，未來會有一艘巨大的、擁有所有最新設備的星艦，聳立在雲霄。但，另有一種可能，卻是應用奈米科技，創造微型星船——可能不會大於一個頂針、一根針或甚至更小。我們有先入為主的偏見，以為星船就必需像「企業號」一般巨大，足以支撐一群太空人。但具有主要功能的星船，有可能以奈米科技縮小，所以，有可能將數百

萬艘微型奈米船發射前往鄰近的恆星。我們只要製造少部分奈米船，一旦它們到達接近的衛星，它們可以創造工廠，無限地複製自己。

網際網路原始創立人之一的文特·瑟夫預期，微型奈米船不僅能探測太陽系，還能探測其他恆星。他說：「透過建造小而強有力的奈米級裝置，恆星系統的探測，將會更有效率。這些裝置將很容易運送到我們鄰近的行星和衛星的表面、地表下以及大氣中……我們甚至可以推斷出，星際探索的可能性。」

在大自然中，哺乳動物只生產少數後代，並確保它們存活。而昆蟲生產大量子孫，只有少部分存活。兩種策略都能使物種存活數百萬年。以此類推，我們不一定要送單一、昂貴的星艦前往其他星星，而可送出數百萬微型星船，每一艘只需一分錢，而且只需要很少的火箭燃料。

在大自然中發現一個非常成功的策略以後，這個概念已經成為固定類型：群聚。鳥類、蜂群和其他飛行動物往往成群結隊。不僅因為數量大較為安全，而是群體也扮演早期警報系統的角色。如果在群體的一部分發生危險性干擾（例如掠奪者的攻擊），訊息迅速傳到其餘成員。它們的能量運用也很有效率。當鳥類以典型的V字形飛行時，這種類型所產生的尾波和湍流會降低每一隻鳥飛行所需能量。

科學家將群聚視為擁有「超個體」的特性，這種超個體有超越任何個體的群體智慧。例如，螞蟻神經系統簡單，腦部很小。但它們的群體可以創造出複雜的蟻塚。科學家希望從自然吸收一些這類的教訓，應用於設計群體性機器人，讓它們有一天能夠踏上前往其他行星和恆星的旅程。

這與五角大廈追求的「聰明塵」（smart dust）的假設性觀念類似：數十億顆粒子送入空中，每一顆都帶有偵查感應器。每一個感應器的智能並非很高，但它們可以集體傳送如山的資訊。五角大廈的國防先進研究計畫署已經以經費支持此一研究軍事應用的可行性，例如監控敵人在戰場中的位置。在二○○七年和二○○九年，空軍發表政策說明書，說明未來數十年的計畫細節，綱要所列，從「掠奪者」的先進版（現在一件四百五十萬美元），到小於飛蛾每件數美分的小感應器群體都有。

科學家也對這個觀念感到興趣。他們想要在颶風、暴風雨、火山爆發、地震、水災、森林大火以及其他自然現象發生期間，噴灑聰明塵去即時監控成千上萬個地點。例如，在電影《龍捲風》（Twister）中，我們看

到一群堅強的風暴追逐者，冒著生命的危險，將感應器放在龍捲風四周。這並非很有效率。與其由少數科學家在火山爆發，或龍捲風來襲時置放少數感測器，以測量溫度、溼度及風速等資料，不如用聰明塵從數千不同地點，同時在數百里內蒐集資料。當這些資料輸入電腦時，就能立即提供颶風或火山轉變的即時資訊。這個研究目前已有商業上的風險性投資設立，準備在市場推出這種感測器（有些比大頭針的針頭還要小）。

另一個奈米船的優點，在於只需很少的燃料，就能將它們送入太空。不用巨大的只能達到時速二萬五千英里的推進火箭，要以難以置信的高速將微小的物件送入太空相對容易。事實上，要用普通電場以接近光速將次原子送入太空很容易。這些奈米粒子帶有很小的電荷很容易以電場加速。

不需耗費巨大資源把一個探測器送到另一個衛星或行星，單一的奈米探測器可能有能力自行複製，因而創造了整個工廠或甚至月球基地。然後這些自我複製的探測器，又可以發射去探索另一個世界。（問題是，怎樣才能創造出第一個自我複製的奈米探測器——它仍然還在遙遠的未來。）

一九八○年，NASA認真考慮自我複製機器人探測器的概念，招集了一個名為「太空任務的先進自動化」的研究會議，由聖克拉拉大學主辦，討論到數種可能性。NASA科學家探討的一種可能，是送細小、自我複製的機器人到月球。因而，機器人會用月球的泥土，複製無數的自己。

多數的報告致力於建立化學工廠以處理月球岩石細節——這種岩石被稱為「表皮土」（reghlith）。例如，機器人將降落於月球，先自行解體，然後以其零件重組成新工廠（很像玩具變形機器人）。又如，機器人可能創造一個拋物線形的鏡子來集中日光，開始熔化表皮土。然後它將用氫氟酸附著並開始處理表皮土，以吸取有用礦物和金屬。然後金屬可以編織成月球基地。最後，機器人將建立一個小型月球工廠來複製自己。

二○○二年，NASA的先進概念研究所又在這些有關自行複製的機器人報告的基礎上，開始以經費支持系列計畫。有一個科學家，已經在認真研擬建立在一個晶片的星船計畫，他就是康乃爾大學的梅森‧佩克（Mason Peck）。

我曾有機會在佩克的實驗室訪問他。在那兒，你可以看見他的工作台堆滿最後可能送入軌道的零件。工作台隔壁是一個小型且乾淨的房間，牆面覆蓋塑膠，精緻的衛星零件就在那裡組合。

他的太空探索願景，與好萊塢電影帶給人的大不相同。他想像一個微晶片（一公分大，一公克重）能夠被加速到光速的百分之一至百分之十。他將利用彈弓效應的優點（NASA用來以高速拋出太空船）。這個引力協助操作涉及送太空船環繞一個行星（如同彈弓上的石子），因而利用行星的引力去增加太空船的速度。

但佩克打算不用引力，而用磁力。他的觀念是把一個微晶片太空船，送到木星的磁場（大於地球磁場二萬倍）迅速繞行。他計畫讓奈米船以此一磁力加速。我們的粒子加速器，就是用磁力把次原子粒子加速到好幾兆電子伏特。

他讓我看一個晶片樣本，他認為有一天它會被投到木星軌道去。那是一個比指尖還小的小方塊，塞滿科學迴路。他的星船將極簡單。在晶片一端，有太陽能蓄電池，以提供通訊的能量。在另一側，有一個無線電發射機、照相機和其他感應器。這個裝置沒有引擎，因為只用木星的磁場推動。（NASA的先進概念研究所，是於一九九八年開始以經費支持此一計畫和其他太空創新擬議，很不幸地，由於預算刪減，該研究所於二○○七年關閉。）

所以，佩克的星船願景，截然不同於科幻小說中所見的龐然巨艦——由一群勇敢的太空人駕駛，轟隆進入太空。比方說，如果在木星的一個衛星上面建立了基地，則可以發射數十個小晶片進入這個巨大行星的軌道。如果一個雷射炮的電池也建立於這個衛星，則透過雷射光的照射，這些晶片就可以加速，直到它們達到光速的某一比率。

然後，我問他一個簡單的問題：你能運用奈米科技將你的晶片縮小到分子的大小嗎？如果可以，就不需利用木星的磁場為這些晶片加速，而利用建立於我們的月球基地的粒子加速器，以接近光速發射分子大小的探測器。他同意這是可能的，但他還沒想通細節。

所以我們取出一張紙，一起算出這個可能性的公式。（這是我們從事研究的科學家互動的方法，走到黑板前，或拿出一張紙，寫下公式來解決問題。）我們寫下洛倫茲力（Lorentz Force）的公式——佩克用它來為

繞行木星的晶片加速。然後我們將晶片的尺寸降低至分子的大小，將它放進一個假設性的（類似CERN的大強子對撞機）加速器中。我們可以很快的看到，公式允許這種奈米船，只用在月球基地上的粒子加速器，就能加速至接近光速。由於我們將星船的尺寸，從一個晶片縮小到一個分子，所以能夠將加速器從木星的大小，縮小為傳統粒子加速器。看來這個構想還真的有其可行性。

但是在分析此一公式之後，我們雙方同意，唯一的問題是這些精緻的奈米船的穩定性。加速器會不會最後將這些分子解體？如同一個用線繫著繞圈旋轉的球，這些分子在接近光速時將會遭遇離心力。這些分子也會有電荷，所以即使電場也可能將它們解體。我們都獲得相同結論，認為奈米船肯定有其可能性，但尚需數十年研究，才能將佩克的晶片縮小到分子的尺寸，並強化它們，使它們在加速至接近光速時不致解體。

所以，佩克的夢想就是：送一群晶片到最接近的恆星，希望其中有一些真的能夠跨越星際太空。但當它們到達時要做什麼？

這就是卡內基梅隆大學矽谷校區張沛（Pei Zhang）研究的著力點。他已經創立了一個有一天會飛到另一個星球的迷你直升機隊伍。他很榮耀地向我展示看起來像是玩具直升機的「群體機器人」隊伍。但外觀能欺人。我可以看到每一個機器人中間有一個布滿迴路的晶片。按下一個按鍵，他就釋放四個「群體機器人」進入空中，向著各個不同方向飛行，並送回資訊。很快地，我被「群體機器人」包圍了。

他告訴我，這些「群體機器人」的目的，就是當緊急狀況（如火災或爆炸）發生時，透過偵查和監控，可以提供關鍵性訊息。最終，這些「群體機器人」可以裝配電視照相機和感應器，來偵測緊急時所需的重要資訊如溫度、氣壓、風向等等。戰場、火場，甚至外星球地面，可以放出數千「群體機器人」。如果其中之一碰到障礙，它會以無線電傳送此一資訊給其他的「群體機器人」。

所以，太空旅行的版本之一，將是佩克所設計的成千上萬廉價而又用過可棄的晶片，以接近光速射往最接近的星球。一旦其中一部分到達目的地，它們會長出翅膀和槳葉，如同張沛的「群體機器人」隊伍，飛過外星球地面。然後它們會以無線電送資訊回地球。一旦有希望的行星被發現了，第二代的「群體機器人」將被送過去，在這些行星建立工廠，而

這些工廠又將複製更多這種「群體機器人」，讓它們飛往下一個星球。於是，這種歷程無限地延續下去。

出走地球？

到了二一○○年，我們可能已經送太空人到過火星和小行星帶，探索過木星的衛星，並且開始啟動送探測器前往其他恆星的第一步。

但人類自身又如何呢？我們會在外太空找到新家，以太空殖民地來舒緩人口問題嗎？人類會在二一○○年開始離開地球嗎？

不會。考慮到成本，即使到二一○○年和以後，大部分人類仍然不會登上太空船，去訪問其他行星。雖然有少數太空人會在行星中建立小小的前哨站，人類本身仍將被局限於地球上。

基於地球將是未來好幾個世紀人類的家這個事實，會產生另一個問題：人類文明本身將如何演化？科學將如何影響我們的生活形態、工作以及我們的社會？科學是繁榮的引擎，所以它會如何重塑未來的文明和財富？

譯注1：原名Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun，意思是「依靠太陽輻射加速的星際風箏」，縮寫名取自希臘神話人物。

第七章　財富的未來——贏家和輸家

科技與意識形態正撼動著二十一世紀資本主義的基礎。科技正在使技能和知識成為永續策略優勢的唯一來源。

——萊斯特·瑟羅（Lester Thurow）

本章重點

世紀初期（現在—二○三○）

科技的四階段／為何會泡沫化和崩潰

世紀中期（二○三○—二○七○）

各種工作形態中的贏家和輸家／娛樂的未來／駭客任務

遙遠未來（二○七○—二一○○）

對資本主義的影響／從商品資本主義到智慧資本主義／數位差距？／入門級工作／國家之間的贏家和輸家／占科學的便宜／有待把握的未來／新加坡的教訓／未來的挑戰

在神話中，大帝國的興亡取決於它的軍隊的力量和狡詐。羅馬帝國的大將軍，在決定性戰役前，要在戰神馬爾斯（Mars）廟祈禱。索爾傳奇性的英勇事蹟鼓舞維京人參加英雄性戰鬥。古人建立巨大的神廟和紀念碑奉獻給神，以紀念對敵戰鬥的勝利。

但是當我們分析偉大文明的興起和衰亡時，我們發現了完全不同的故事。

如果你是來自火星的外星人，在一五○○年造訪地球，並觀察所有偉大的文明，你會認為哪一個最後會支配這個世界？答案將很簡單：除了歐

洲以外的任何文明。

在東方，你會看到延續數千年的偉大中華文明。中國人領先的發明名單一大串，無可匹敵：紙、印刷術、火藥、羅盤等等。它的科學家是世界最優秀的。它的政府統一而且整個大陸處於和平狀態。

在南方有鄂圖曼帝國（Ottoman Empire），它差一點就統治了整個歐洲。偉大的穆斯林文明發明了代數，在光學和物理學方面大有進展，並且為眾星命了名字。藝術和科學都很興盛。它的大軍所向無敵。伊斯坦堡是世界上科學學習的偉大中心之一。

然後你看到可憐的歐洲各國，受盡宗教的基本教義派、巫術審判和宗教法庭的折磨。歐陸西部，從羅馬帝國崩潰以後急遽倒退千年，技術仰賴進口。那是一個中世紀的黑洞。多數羅馬帝國時期的知識長期消失，代之以令人窒息的宗教教條。反對者或異議人士經常面對酷刑或更糟的處境。還有，歐洲的城邦連年在交戰之中。

然後，發生了什麼？

中華和鄂圖曼兩大帝國，都陷入了長達五百年的科技停滯時期，而歐洲則前所未有地開始擁抱科學和技術。

一四○五年開始，中國的明成祖永樂皇帝，下令建立龐大的海上艦隊去探索世界。船隻也是有史以來最大的，哥倫布的三艘小軍艦，可以輕易地放在其中的一艘大船甲板上。前後進行七次大規模探索，一次比一次規模大。這個艦隊沿著東南亞海岸航行，遠達非洲、馬達加斯加，甚至可能更遠。艦隊帶回大量物產、珍饈，也從地球的遠方帶回珍禽異獸。木刻印刷中顯示出，令人驚奇的非洲長頸鹿曾在明朝的動物園中遊行。

但是中國的統治者也很失望。世界所有就是這樣嗎？那些能與中國抗衡的大軍在哪裡？世界其他地區所能提供的只有奇珍異獸？中國的繼任統治者失去了興趣，讓他們的偉大軍艦腐壞，最後燒掉了。中國漸漸地孤立於外在世界，當世界向前衝刺時，它停滯不前。

在鄂圖曼帝國也形成了類似的態度。在幾乎征服了他們所知的大部分世界之後，土耳其人轉而向內，進入宗教基本教義主義，和數世紀的停滯。前馬來西亞總理馬哈迪·穆罕默德（Mahathir Mohamad）曾說：

「當穆斯林學者以可蘭經詮釋知識的獲得時，只有它是唯一的宗教知識，其他知識則是非可蘭經的，於是偉大的伊斯蘭文明就開始衰退了。結果，穆斯林放棄了科學、數學、醫藥以及其他所謂塵世學科的研究。取而代之的是，他們花很多時間去辯論伊斯蘭教義，及解釋伊斯蘭法律學和伊斯蘭實踐，導致整個穆斯林世界的分裂，造成許多宗派、教派和學派。」

不過，在歐洲卻開始了大覺醒。貿易帶進了新鮮、革命性的觀念，古騰堡（Gutenberg）印刷出版也加速了此一發展。教會的力量在支配千年之後開始衰微。大學慢慢地把詮釋聖經模糊章節的注意力，轉向牛頓物理學和道爾頓（John Dalton）化學等的應用。耶魯大學歷史家保羅‧甘迺迪（Paul Kennedy）在歐洲快速的興起加上一個因素：歐洲力量差不多的強權間不斷的戰爭狀態，但沒有一個可以支配整個大陸。不斷地互相戰鬥的君主，撥款給科學和工程學，以擴充其領土野心。科學不僅是學術的活動，更是創造新武器和新財富的途徑。

很快地，歐洲科學和技術的興起，弱化了中華帝國和鄂圖曼帝國的力量。當歐洲航海人員開闢通往新世界和東方的航道，特別是繞過非洲、避開中東之後，作為東西方貿易通道，曾經繁榮好幾個世紀的穆斯林文明衰退了。中國發現它自己的門戶被歐洲的炮船打開，而諷刺的是，他們應用了兩項中國人的關鍵性發明：火藥和羅盤。

對於「發生了什麼？」這個問題的答案很清楚。科學和技術發生了。科學和技術是繁榮的引擎。當然，你可以忽視科學和技術的存在，但危險的是你自己。世界不會因為你正在誦讀宗教經文就靜止不動。如果你無法掌握最新的科學和技術，競爭者就會去掌握它。

掌握四大力量

但精確地說，歐洲這匹黑馬，是如何在好幾個世紀的蒙昧無知之後，突然奮力衝刺，超越中國和穆斯林世界？這個令人驚奇的爆冷門，有其社會的和技術的因素。

分析一五○○年以後的歷史，我們認識到，歐洲在封建主義解體、商人階級興起，以及文藝復興運動充沛的活力之時，進入另一個大躍進的時機已經成熟。不過，物理學家則是透過規範宇宙的四種基本力量的鏡

頭，來看待此一大轉變。宇宙有這些可以解釋我們周邊所有事物（從機器、火箭和炸彈到眾星及宇宙本身）的基本力量。要改變社會趨勢，就需要為此一改變設定舞台。但那是因為歐洲掌握了這些力量，所以它們會推動歐洲到全世界的最前列。

第一種力量是引力，它把我們拉住固定在地面，避免太陽爆炸，並將整個太陽系維繫在一起。第二種力量是電磁力，它照亮我們的城市、使我們的發電機和引擎有能量，並推動雷射和電腦。第三和第四種力量是弱核子力和強核子力。它們把原子核維繫在一起、在天空點亮恆星，並且在我們的太陽中心產生核子火。所有這四種力量都是在歐洲被揭開。

每次這些力量之一被物理學家所了解，人類歷史就改變，而歐洲最適合去利用那個新知識。當牛頓目擊一個蘋果掉落並注視著月亮時，他問了自己一個永遠改變人類歷史的問題：如果蘋果會掉下來，那麼月亮也會掉下來嗎？他在二十一歲的時候，靈光一閃，認識到那吸引蘋果的力量，跟所有到達行星和彗星的力量沒有兩樣。這容許他去運用一種他剛發明的數學（微積分），去繪製行星和月亮的軌道，也首度為天體的運動解碼。一六八七年，他出版的傑作《自然哲學的數學原理》（Principia），可以說是有史以來最重要的科學著作，也被評定為人類歷史上最有影響力的著作之一。

更重要的是，牛頓提出了一種新的思考方法——一種可以透過力量計算移動物體的運動機制。對於物體的運動，我們不再受到有關靈魂、魔鬼和鬼魂的奇想所支配，而是認為物體因為充分界定（可以測量和控制）的力而移動。這又帶來了牛頓力學，科學家可以用它正確地預測機器的行為；而這一點又為蒸汽機及火車頭鋪了路。複雜的蒸汽動力機器的複雜動力學，可以用牛頓定律有系統地分解，成為一個一個的螺栓和一個一個的槓桿。所以牛頓的引力描述為歐洲的工業革命鋪了路。

然後到了十九世紀，還是在歐洲，法拉第、馬克士威等人，駕馭了第二種力量——電磁力，帶來了第二次大革命。愛迪生在下曼哈頓的珍珠街站建造發電機，並使世界第一條街道電氣化時，他也打開了整個地球電氣化的大門。今天，我們可以在夜間從外太空看見地球，也看見幾個大陸，都是整個閃閃發光。從太空俯視地球，任何外星人都會立刻知道，地球人已經掌控了電磁力。每當大停電發生時，我們就更加認識到我們對它的依賴。頃刻間，我們突然被丟回一百年以前，沒有信用卡、電

腦、電燈、電梯、電視、收音機、網際網路、汽車等等。

最後是核子力（也是由歐洲科學家主宰）。它改變了我們周圍的一切。不僅讓我們打開天堂的祕密（揭露點亮恆星的能源），也解開內在的空間——透過磁振造影、電腦斷層掃描、正子斷層掃描、放射性治療和核子醫學等，並把這些知識應用於醫學上。由於核子力控制著儲存於原子中的無限能量，它最終能決定人類的命運。不管是我們會因主宰了融合的無限力量而繁榮，還是死於核子地獄。

世紀初期（現在—二○三○）

科技的四階段

社會條件的變遷和對四種力量的掌控結合在一起，把歐洲推到世界各國的最前緣。但科技是動態的，隨時都在改變。它們誕生、演化並且興起和衰落。為了知道特定科技會在未來如何改變，先了解科技如何遵循演化的法則是很有助益的。

大眾科技通常依循四個階段演變。我們可以在紙、自來水、電力以及電腦等看到演化的過程。在第一階段，科技產品實在太昂貴，它們必須小心看管。當紙張以紙莎草的形式由古代埃及人（隨後中國人也發明紙）於數千年前發明時，它非常珍貴，因而一卷紙莎草要由好幾十個祭司小心看守。這個微小的技術使古代文明有了動力。當古騰堡發明活字版印刷時，紙在一四五○年左右進入第二階段。這使得「私人書籍」成為可能，因而個人可以擁有一本書，其中含有好幾百卷軸的知識。在古騰堡以前，全歐洲只有三萬冊書籍。到了一五○○年，就有了九百萬冊，因而攪動了密集的智慧酵母，激起了文藝復興。

但是到了一九三○年左右，當每一張紙的價格降至一分以下時，紙進入第三階段。這使得個人圖書館成為可能，一個人可以擁有好幾百本書。紙張變成了日常用品，以噸計量銷售。紙張無所不在，卻也隱匿無蹤。現在我們已經到了第四階段，紙張變成時髦的表達。我們以各種顏色、形狀和大小的紙張來裝飾我們的世界。城市垃圾最大的來源是紙張。所以，紙張從小心看管的物品演變成廢物。

同樣的規律可以應用於自來水。在古代（第一階段），水很珍貴，一口

井必須由整個村莊分享。這個階段維持數千年，直到二十世紀初年，私人水管逐漸流行，進入第二階段。到了第二次世界大戰以後，自來水進入第三階段，變得便宜足以擴大供應至中產階級。今天，自來水已進入第四階段（一個時髦的表達），出現各式各樣的形狀、大小和應用。我們以水裝飾我們的世界——用噴泉和各種展示。

電力也經歷了相同的階段。有了愛迪生等人的開拓性努力，第一階段，一個工廠分享一個燈泡和一個發動機。第一次世界大戰以後，我們進入第二階段，有了個人用的燈泡和汽車。今天電力消失了，它到處存在卻也隱藏無蹤。連「電力」一詞都快要在英語中消失了。在聖誕節，我們以好幾百個閃爍燈光裝飾我們的家。我們假定電力就藏在牆內，無所不在。電力是一種時髦的表達，點亮了百老匯，也裝飾了我們的世界。

在第四階段，電力和自來水都成了日常用品。它們非常便宜，我們大量消費它們，因而以電表和水表來度量進入家中的水電。

電腦也追隨同樣類型。了解這一點的公司蓬勃發展。不了解的公司被推向破產。IBM在一九五○年代以大型主機支配了第一階段。一台主機非常昂貴，因而由一百個科學家和工程師共同分享。不過，IBM的管理階層未能領會摩爾定律，所以當一九八○年代由於個人電腦來臨，進入第二階段時，他們幾乎破產。

但是，連個人電腦製造商也會自滿。他們夢想在每一個桌面上有一個獨立的電腦。他們沒有提防第三階段的到來——網際網路將電腦連接起來，透過它，一個人可以和數百萬台電腦互動。今天，唯一可以看到單獨存在的電腦的地方是在博物館。

所以未來的電腦，最終將進入第四階段——它將消失，而以時髦的方式復活。我們將以電腦裝飾世界。「電腦」這個辭彙本身，將會逐漸消失。未來，都市垃圾最大的成分將非紙張而是晶片。未來的電腦將會消失而成為日用品，像水電一般銷售。當運算在「雲端」執行時，電腦晶片會逐漸消失。

所以，電腦的演化也不會神祕，它也會追隨前輩（如電力、紙張和自來水）陳舊的路徑。

但是電腦和網際網路仍在演化中。當經濟學家約翰‧葛登（John

Gordon）被問到這個革命是不是結束了時，他說：「天呀，還沒呢。如同蒸汽機，它在完全玩完以前，還有一百年。我們現在的網際網路，就如同一八五○年代的鐵路。它才剛剛開始。」

我們必須指出，並非所有的科技都會進入第三和第四階段。例如，考慮一下火車頭。機械化運輸由於蒸汽火車頭的來臨，於十九世紀進入第一階段。一百個人要分享一個火車頭。到了二十世紀初期，由於「個人火車頭」（也就是汽車）的出現，我們進入了第二階段。但是火車頭和汽車（實質上就是在軌道上或輪子上的一個盒子）在過去數十年並未改變很多，已有的改變都只是細部的改善，例如更有力、更有效率的引擎，和更有智能。所以無法進入第三、四階段的科技，將被美化；例如，它們將會被裝入晶片而變得更有智能。某些科技一直進化到第四階段，例如電力、電腦、紙和自來水。其他的科技則在中間的階段被絆住，但以漸進的改良（如晶片和增加效能）繼續演化。

為何會泡沫化和崩潰

但是現在，隨著二○○八年的大衰退之後，有些人說，所有的這些進步都是虛幻的，因而我們應當回頭去過簡單的日子。又說，這個系統存在著根本的缺陷。

如果採取長久以來的傳統觀點，我們可以很容易地指出，這種意料之外的、巨大的泡沫和毀壞似乎不知從何而來。它們好像是隨機出現，是無常命運和人類愚行的副產品。有關二○○八年的崩潰，歷史學家和經濟學家已經寫了很多，它們檢驗許多變因，嘗試找出其中的意義，例如人類本性、貪婪、腐敗、缺乏紀律、疏忽監督等。

不過，我卻以不同的方法來看待此一大衰退——用科學的眼鏡來看。長期而言，科學是繁榮的引擎。例如，《牛津經濟學史百科全書》裡引用相關研究報告說：「英國和美國一七八○年以後的收入增長，百分之九十要歸因於科技的創新，而非僅是資本的累積。」

沒有科學，我們將被丟回數千年前的昏暗時代。但科學並非始終如一，它來如波浪。一個開創性的突破（如蒸汽機、電燈、電晶體）往往會引發連鎖反應，帶來大量的次級發明，而這些又如雪崩一般創造了大量的創新和進步。因為它們創造了大量財富，這些波浪應當會在經濟中反映

出來。

第一個大波浪是蒸汽的力量，它最終導致蒸汽火車頭的發明。蒸汽的力量成就了工業革命。而工業革命又將社會徹底翻轉。驚人的財富因蒸汽力而創造。但是在資本主義之下，財富永不停滯。財富必須有去處。資本家不眠不休地獵取下一個突破，並將移轉財富去投資在甚至更投機的計畫，因而有時造成災難性後果。

在十九世紀早期，由蒸汽力量和工業革命產生的許多過剩財富，投入倫敦股票交易所的火車頭股票。事實上，泡沫開始形成了，有數十個火車頭公司出現在倫敦交易所。《紐約時報》的商業作家維吉尼亞˙波士特蕾（Virginia Postrel）寫道：「一個世紀以前，鐵路公司占紐約證券交易所股票名單的一半。」因為火車頭仍在起步階段，這個泡沫難以維持，而且終於破了，造成了一八五○年的崩潰——那是資本主義歷史上最大的崩潰之一。隨後由於工業革命產生的過量財富，又有一系列的迷你型崩潰（大約每隔十年一次）。

諷刺的是：鐵路的全盛期是在一八八○年代到一八九○年代。所以一八五○年的崩潰是由於投機的一窩蜂和科學創造的財富，但真正推廣鐵路到全世界的工作，尚需好幾十年才會成熟。

湯瑪斯˙佛里曼（Thomas Friedman）寫道：「在十九世紀，美國有一個鐵路狂飆、泡沫和破滅……但即使泡沫破了，它留給美國鐵路基礎建設，使得橫越大陸的旅行和貨物運送戲劇性地變容易又便宜。」

資本家並未從這裡學到教訓，這個循環很快地又再重複。第二波科技大浪潮又散開了，那是由愛迪生和福特所領導的電力和汽車革命。工廠和家庭的電氣化，和T型汽車的激增，再度創造出驚人的財富。一如往常，過量的財富必須有個去處。在這個案例中，它是跑進美國股票交易所，形成公用事業公司和汽車公司的股票泡沫。人們忽視了一八五○年崩潰的教訓，因為那已經是八十年前的陳年舊事。從一九○○年到一九二五年，汽車創業公司達到三千家，市場根本就無法支持那麼多。再一次，這個泡沫無法持久。由於種種理由，泡沫於一九二九年破滅，造成了經濟大蕭條。

但弔詭的是，美國和歐洲的公路鋪設和電氣化，要直到股市崩潰以後，於一九五○年代到一九六○年代才開始進行。

最近，我們有了科學的第三個大浪潮——高科技的來臨，它以電腦、雷射、太空衛星、網際網路和電子產品的形式出現。高科技創造的驚人財富必須有個去處。在此一案例，它跑到房地產，創造了一個巨大的泡沫。當房地產的價值衝破了屋頂，人們開始依靠他們的家（把它們當作撲滿）來借錢，這又加速了泡沫的擴大。肆無忌憚的銀行家如用水般提供房屋貸款，又使泡沫火上加油。人們再度忽視了一八五○年和一九二九年的崩潰教訓——那已是一百六十年和八十年前的事。不幸地，這個新的泡沫，也無法維持，我們又要面對二○○八年的崩潰和大衰退。

湯瑪斯‧佛里曼寫道：「二十一世紀初期看到了金融服務業的狂飆、泡沫，而現在破滅。但我恐怕它會留下的是，佛羅里達有一大堆本來不該興建的空蕩蕩公寓，一些富人不再付得起的舊噴射機，以及一堆無人了解、且早已變成壁紙的衍生性產品合約。」

但儘管最近的崩潰伴隨著所有蠢行，諷刺的是，全世界的電纜系統和網路系統，在二○○八年崩潰之後才要大肆擴充。資訊革命的全盛時期還沒到來呢。

這又導向下一個問題：第四波是什麼？沒有一個能夠確定。它可能是人工智能、奈米科技、傳播和生物科技的複合體。如同前面的幾個循環，它可能需要另一個八十年，使這些科技創造一波令人驚奇的財富。在二○九○年左右，但願人們不會忽略了前面八十年的教訓。

世紀中期（二○三○—二○七○）

各種工作形態中的贏家和輸家

在科技的演變過程中，會造成經濟的突然改變，有時會導致社會混亂。在任何變革中，都有贏家和輸家。到了世紀中期，這一點將更加明顯。我們的每一個村莊，都已經不再需要馬蹄鐵匠和製造馬車的人。還有，我們也不會為這些工作的消逝而傷感。但問題是：在世紀中期，什麼工作會較興旺？科技的演變會怎樣改變我們的工作方式？

我們只要問一個問題，就能得到部分答案：機器人的極限哪裡？如同我們已讀過的，人工智能至少有兩個基本的絆腳石：模式辨識和判斷力。

因此，基本上，未來會繼續下去的工作，就是那些機器人做不好的——那種需要辨識和判斷力的工作。

在藍領工人中，輸家將是那些只執行重複動作的工人（如在工廠裝配線的汽車工人），因為機器人比他們在行。電腦給人擁有智能的假象，但那只是因為它們做加法時比我們快百萬倍。我們忘了電腦只是精通加法的機器，因而重複性工作做得最好。這就是為什麼一些汽車裝配線工人，在電腦革命的第一批受害者名單中。這意味著，任何工廠的工作，如果能簡化為一系列指令，則工人的重複性動作最終將會消失。

令人訝異的是，在藍領工人中，有一大類的人，不但會在電腦革命的洗禮中存活，甚至會更加興盛。垃圾收集工人、警察、建築工人、園丁和水管匠未來都會有工作。垃圾收集工人為了在不同的家庭和公寓收拾垃圾，必須認得垃圾袋，把它放進卡車，並將它拖進垃圾堆。但不同的垃圾必須用不同的方法處置。對建築工人而言，執行每一種個別的工作，需要不同的工具、藍圖和指令。沒有兩個建築基地或工作是相同的。警察必須分析不同狀況下的各種犯罪行為。更重要的是，他們也要了解動機和作案手法，而這些都是電腦所難以勝任的。類似情形，每一個花園和洗臉盆都不相同，需要不同的技術和水管工具。

在白領工人中，輸家將是涉及中介工作的管理庫存和機關商號的櫃員或統計員，這意味著低階的仲介、經紀、出納和會計等等，將會在工作消失時，逐漸被逐出工作。現在人們已經可以跳過旅行社，自己上網比價購買機票。

以美林證券（Merrill Lynch）為例，它曾有一個著名的聲明說，永遠不會進行線上股票交易。它將一直實施老式的股票交易。美林的股票經紀主管約翰‧斯特芬斯（John Steffens）說：「以網路交易為中心、投資人自己動手操作的投資模式，應被視為對美國人財務生活的嚴重威脅。」因而，當它終於在市場壓力下，於一九九九年接受線上交易時，顯得很不光彩。ZDNet新聞的查理‧加斯帕里諾（Charles Gasparino）寫道：「歷史上很少有產業的領導者，會被迫在一夕之間做一百八十度的轉變，接受那種實質上是新的經營模式的東西。」

這也意味著，公司的金字塔將會扁平化，因為最高級人員將可直接與行銷隊伍及商場代表互動。以中間人來貫徹上級命令的需要減少了。事實

上，當個人電腦開始進入辦公室時，這種工作的減少就已發生。

所以，未來的中間人如何才能存活？他們必須能對工作提供附加價值，並提供機器人所無法提供的有價值之物：判斷力。

例如，未來你將能夠在手錶或隱形眼鏡上網，購買一棟房子。但是沒有人會用這個方式來買房子，因為這將是你這輩子所作的最重要的財務交易之一。要購買像房子這種重要的東西，你會想跟一個人商談，請他告訴你好學校在哪裡，哪裡犯罪率較低，排水系統如何運作等等。為了這些，你願意和一個有能力提供附加價值的中介人商談。

類似的情況，低階股票經紀人的飯碗被線上交易推倒，但能夠給人合理的、聰明的投資建議的經紀人，永遠會有需求。經紀工作會繼續枯竭，除非他們能提供附加價值服務，如頂尖市場分析師和經濟學家的智慧，以及有經驗的經紀人的內線知識。在一個線上交易無情地降低交易成本的時代，股票經紀人若要存活，就要能夠推銷他們的無形資產，例如經驗、知識和分析。

所以，在白領階級中，贏家將是那些能夠提供有效判斷力的人。這意味著與創造力有關的工作人員——藝術工作、表演、說笑話、寫軟體、領導能力、分析、科學、創造力——那些「使我們成為人類」的品質。

從事藝術的人會有工作，因為網際網路對創造性藝術有難以填滿的需要。電腦擅長複製藝術，並幫藝術家美化藝術，但他們對於原創性新型式卻一竅不通。藝術會鼓舞、誘發、喚起情緒，並使我們興奮，那是電腦能力所不及，因為這些品質都與判斷力有關。

小說家、編劇和劇作家將會有工作，因為他們必須傳達真實的情境、人性衝突和人類的成與敗。對電腦而言，模擬人類天性涉及動機和企圖的了解，超乎它們的能力。電腦對於什麼會使我們哭或笑並不在行，因為它們自己並不能哭或笑，或了解什麼是有趣，什麼是悲傷。

涉及人際關係的人（如律師）會有工作。

雖然機器律師可以回答初步的法律問題，但法律本身會不斷隨社會標準以及更多因素而改變。法律的詮釋，最終會歸結於價值判斷，而電腦對那個領域無能為力。如果法律有是非分明的解釋，也就不需要法院、法

官和陪審團了。機器人無法取代陪審員，因為陪審員往往代表某一特定團體的道德觀，而那是隨時會改變的。這一點最明顯，當最高法院法官波特·史都華特（Potter Stewart）一度必須界定色情時，他辦不到，但下結論說：「我一看就知道了。」

還有，以機器人代替司法系統可能違法，因為法律奉為圭臬的是：陪審團由我們的同儕組成。因為機器人不是我們的同儕，用它們來取代司法系統是違法的。

表面上，法律似乎很確定，並且已經用精確和嚴格的辭彙界定清楚，然後加上冠冕堂皇的標題和定義。但這只是表面，因為這些定義的解釋經常會變動。例如，美國憲法似乎是界定清楚的文獻，但最高法院對於爭論性問題經常意見分歧，僵持難決。它經常需要重新詮釋其中的每一個字和片語。人類價值改變的本質，只要審視歷史就很容易看到。例如，最高法院於一八五七年裁定，奴隸不得成為美國公民。從某一觀點看來，南北戰爭和死亡數十萬人推翻了那個決定。

領導才能在未來也是有價值的物品。部分原因在於，領導力包含掌握所有已有的資訊、觀點和選擇，然後做一個與某些目標一致的最佳選擇。領導力有時特別複雜，因為它關係到鼓舞並指導人類工作者，而他們各有自己的優缺點。所有這些條件，需要對人類的本質、市場力量等有深入的了解，而那些相關因素卻在電腦的能力之外。

娛樂的未來

這也意味著整個行業（如娛樂事業）遭遇巨變。例如，音樂這一行從遠古以來，就是根植於個別的樂師，由一個市鎮到另一個市鎮，做個別臨場演出。娛樂人員不停地奔走於途，擺一天攤子，然後又前往另一村。那是一種艱苦的生活，金錢的報酬極少。當愛迪生發明留聲機時，這種古老的類型迅速改變，我們聽音樂的方式也改變了。忽然間，一位歌手可以製作唱片，銷售數百萬片，賺到以前難以想像的金錢。在一個世代內，搖滾歌手就會成為社會的新貴。在前一世代可能曾被認為是低階的侍者，到了下一個世代，搖滾明星成為年輕族群尊敬的偶像。

但不幸的是，音樂行業忽視了科學家的預測——他們預見音樂將會有很容易透過網路（如電子郵件）傳遞的一天。音樂業界不但不為如何透過

線上銷售賺錢建立基礎，反而試圖控訴那些以極微薄的價格提供音樂下載的新興公司。這就像是嘗試抵抗大海的浪潮。這個疏忽導致音樂這個行業內的混亂。

（但好的一面是，不知名的歌手現在不需面對大音樂公司實際存在的審查，就可以升高到排行榜頂端。過去，這些音樂界大人物幾乎可以選擇下一個搖滾明星將是誰。所以，在未來，頂尖的音樂家將以更民主的方式，透過一個全部免費的涉及市場力量和技術選出，而非由音樂企業主管決定。）

報紙也面臨類似的窘境。傳統的報紙可以倚賴來自廣告的穩定收入，特別是分類廣告版。收入的現金流來自分類廣告版，而非賣報紙的收入。但現在我們可以免費下載當天的新聞，也可在各類型的線上廣告網站刊登全國性廣告。如此一來，全國各地的報紙版面和報份都縮小了。

但是這個過程將到此為止。網路上有很多的雜音，有將來式的預言在對他們的觀眾高談闊論，也有自大狂試圖推動奇異的觀念，以致最終人們將追求一種新的產品：智慧。隨機出現的事實與智慧無關，未來人們將會對誇誇其談的部落格感到厭倦，並且尋求可靠的網站提供智慧這種稀有的產品。

如同經濟學家哈米許‧馬克雷（Hamish McRae）所說：「經驗告訴我們，這些大量的『資訊』是垃圾，知識分子等同垃圾信件。」但他也聲言：「好的判斷力將會繼續有很高的價值：整體而言，成功的財務分析師，是世界上待遇最高的研究人員。」

駭客任務

那麼，好萊塢演員又如何？除了成為票房明星和社會談論對象之外，無法大紅大紫的演員得排隊領失業救濟金嗎？最近，人體電腦動畫有顯著的進展，簡直可以亂真。動畫人物現在已能立體呈現面容和陰影。所以男女演員會很快地被淘汰嗎？

可能不會。由電腦模擬人臉有根本的問題。人類會演化出辨識人臉的不尋常能力，是因為我們的存活仰賴著它。只要剎那閃現，我們就必須知道某人是敵是友。在數秒內，我們必須迅速決定一個人的年齡、性別、

力量和情緒。那些無法做這種辨識的人根本就無法倖存以便將基因傳給下一代。因而，人類大腦將很大一部分的處理力量用於閱讀人臉。事實上，在我們演化歷史的大部分時間，在學會說話以前，我們透過手勢和身體語言溝通，而我們大腦的大部分都是用於審視面部微妙的線索。但是電腦卻連辨識周邊的簡單物體都有困難，若要再現真實的動畫人臉那就更難了。兒童看到電影螢幕出現的臉，立刻知道它是真實的人臉還是電腦模擬出來的。（這又回到「穴居人原則」，若是讓我們選擇，要看我們喜愛的動作派大明星的動作片，還是看電腦動畫卡通動作片，我們仍將偏好前者。）

相對地，身體就比較容易被電腦模擬。當好萊塢在電影中創造那些真實的怪物和幻想人物時，他們運用捷徑。一個演員穿著關節上有感應器的緊身衣。當演員移動或跳舞時，感應器送訊號到電腦。於是電腦就會如同在《阿凡達》中所見，創造出動畫人物表演著精確的動作。

我曾於勞倫斯利弗摩爾國家實驗室支持的一個會議中演講。該實驗室是設計核子武器的地方。晚餐時我坐在某個曾經參加電影《駭客任務》拍攝的人旁邊。他對我坦承，他們必須用很多時間進行電腦後製，去創造那支電影中令人眼花撩亂的特殊效果。他說，最困難的一幕是要求他們在直升機飛越上空時，完全重建一個想像的城市。只要有足夠的電腦運算力和時間進行後製，他可以創造出一個完整的想像城市。但他承認，模擬人臉超乎他的能力。這是因為當一束光打在人臉上時，它向著所有的方向消散——取決於皮膚的肌理。每一光點都必需由電腦追蹤。因而，人臉皮膚的每一點都必需以複雜的數學函數去描述，而那才是真正使電腦程式工程師感到頭痛的事。

我插嘴說，這很像我所專長的高能物理學。在我們的粒子加速器中，創造出強有力的質子光線，打在目標上，創造出蓮蓬雨般的碎片，向所有的方向散布。然後我們引用一個數學函數（稱為外型因素）來描述每一顆粒子。

我半開玩笑地問，在模擬人臉與高能粒子物理學之間是否有些關連？他回答說，有。電腦動畫師使用與高能物理學所用的相同形式主義，來創造你在電影中所見的人臉！我從沒想到，我們理論物理學家所用的艱深難解的公式，竟然有解開模擬人臉問題的一天。所以事實是，我們可以認識人臉，就像物理學家分析次原子粒子一樣！

對資本主義的影響

本書討論過的新科技，實在非常強有力，因而到了本世紀末，它們一定會衝擊到資本主義本身。供給和需求的法則仍然相同，但是科學和技術的興起，已經從多方面修正了亞當‧史密斯（Adam Smith）的資本主義——從商品的分配到財富的本質都有。資本主義有一些方面，已經受到立即性的影響：

☆完美的資本主義

史密斯的資本主義是基於供給和需求法則：當任何商品的供給與需求相稱時，價格就決定了。如果有一個商品數量很少而有需求，則價格上揚。但是，消費者和生產者對供需只有部分且不完全的了解，因而價格可以因為地方不同而有很大的差異。所以史密斯的資本主義並不完美。但是這一點將在未來逐漸改變。

「完美的資本主義」是指：當生產者和消費者對市場無所不知時，則價格可以有完美的決定。例如，在未來，消費者將透過他們的隱形眼鏡在網路上搜尋，對所有產品的價格和品質做過比較，得到充分的知識。現在，我們已經能夠在網路上搜尋最低廉的機票。這一點最終將應用於全世界銷售的產品。不管是透過眼鏡、牆面螢幕或手機，消費者將會知道有關某種產品的一切。例如，走進雜貨店，你會掃視陳列的商品，並透過隱形眼鏡上的網路搜尋，立刻知道想買的東西是否便宜。優勢轉移到消費者，因為他們能在頃刻間知道產品的一切——它的歷史、它的性能、同類產品價格以及它的堅固性和可靠性等。

生產者卻也自有錦囊妙計，例如用數據挖掘（data mining）來了解消費者的渴望和需要，並上網搜尋物品的價格。這樣可以免除對價格的猜測。但更重要的，是消費者擁有優勢，可以立即比價，要求最低廉的價格。生產者必需對消費者不斷改變的需求作回應。

☆大規模生產和大量客製化

在現在的系統中，貨物是以大量生產方式製造出來。福特曾說過一句名

言——消費者可以選擇任何顏色的T型汽車，只要他們選的都是黑色的就行了。大量生產急遽地降低成本，取代同業公會和手工業無效率的老系統。電腦革命將改變這一切。

今天，如果顧客看到一件衣服，樣式和顏色都很完美，但尺碼不對，則交易不成。但在未來，我們精確的3D立體測量將儲存於信用卡或錢包中。如果衣服或外套尺寸不合，你可以將自己的規格以電子郵件送至工廠，讓他們立刻做出一件你要的尺寸的衣服。未來，所有的東西都會恰到好處。

大量客製化在今天還不不切實際，因為只為一個顧客生產一個新產品成本太高。但是當所有的人都連上網路（包括工廠）時，客製化產品可以當成大規模生產物件，以相同價格製造出來。

☆大規模技術成為實用工具

當技術產品（如電力和自來水）廣為散布以後，它們就成為實用的公用事業。在資本主義降低價格和競爭增加以後，這些技術產品將會像公用事業一般銷售。也就是說，我們不在乎它們從何而來，而只在我們要用它時付費。同樣情形可以應用到電腦運算。多數運算功能高度依賴網際網路的「雲端運算」，將會逐漸被大眾接受。雲端運算降低了運算成本，使它變成了公用事業——那種我們需要時才付費，而在不需要時不會想到它的東西。

這與今天的情況不同，我們多數人使用打字機、文字處理機、在桌上或電腦上畫畫，然後在需要時上網搜尋資訊。未來，我們可以逐步淘汰電腦，直接上網（按使用時間計費）去接觸我們的資訊。於是電腦運算成為公用事業，如同水電，以碼表計費。我們將住在這樣的一個世界：其中的電器、傢具、衣服等都具有智能，我們會在需要特殊服務時才跟它們說。到處都藏有網路螢幕，當我們需要鍵盤時，它們就會變成實物。功能代替了形式，所以諷刺的是，電腦革命最終會使電腦消失於雲端。

☆對準顧客

過去的公司，都會在報紙、廣播電台、電視等刊登廣告，往往無從得知廣告的效果。公司只能從銷售額的上升計算廣告成效。但在未來，公司幾乎可以立即知道多少人下載或觀看它們的產品。這將容許公司針對觀

眾做出量身打造的產品。例如，如果你在一個網路廣播站接受訪問，有可能精確地判斷多少聽眾在收聽。這也容許公司針對聽眾製作客製化特別節目。

不過，這又帶來了另一個問題：敏感的個人隱私問題，將成為未來最具爭議性的議題之一。過去，有人擔憂電腦會使「老大哥」（Big Brother）成為可能。喬治‧歐威爾（George Orwell）的小說《一九八四》（Nineteen Eighty-Four）中，一個極權主義政權統治地球，展開了一個地獄般的未來，其中到處是間諜，所有的自由都被壓碎，生命只是永無止境的羞辱。在其中的某一個時候，網路將演變成這樣一個全面滲透的監視機器。不過，在一九八九年，蘇聯解體以後，美國國家科學基金會實質地將網路開放了——將一個主要作為軍事用途的設備，轉換成大學間的學術網路甚至是商業設施，最後導致一九九○年代的網際網路大爆發。今天，「老大哥」已無可能。真正的問題是「小阿哥」，那就是，包打聽的雜音、小規模的犯罪、八卦報紙，甚至公司使用數據挖掘來發現我們的偏好。如同我們將在下一章討論到的，這個問題不會消失，只會隨著時間演變。很可能地，將會有無休止的貓追老鼠遊戲——有軟體設計者開發軟體來保護我們的隱私，也有其他人創造軟體來突破它。

從商品資本主義到智慧資本主義

目前為止，我們只問到，科技如何影響到資本主義運作的方式。但是高科技進步所創造的混亂，又如何影響到資本主義的本質？這個革命所創造出來的混亂可以摘要成一個觀念：從商品資本主義（commodity capitalism）轉移到智慧資本主義（intellectual capitalism）。

史密斯時代的財富是以商品來衡量。商品的價格會浮動，但平均的商品價格在過去一百五十年以來，一直穩定地下降。今天，你吃的早餐，一百年前英格蘭國王還吃不到。世界各地的異國珍饈現在則慣常地在超市銷售。商品價格的下跌有種種原因，例如較佳的大規模生產、貨櫃運輸、船運、傳播和競爭。

例如，今日的高中生很難理解，為什麼哥倫布要冒著生命的危險，去發現一條通往東方的較短香料貿易航道。他們問：為什麼他不直接去超市

購買，並拿一點奧勒岡葉（一種可用於調味的香草）？但是在哥倫布的時代，香料和草藥非常昂貴。它們之所以有價值，是因為在那個沒有冰箱的年代裡，這些香料可以掩蓋腐敗食物的味道。有時連國王和皇帝都得以腐壞的食物當晚餐。那時沒有冷凍車、貨櫃或船來越過大洋運輸香料。那就是為何這些商品如此有價值，以致哥倫布為了取得它們而賭上性命——雖然它們現在便宜得要命。

取代商品資本主義的是智慧資本主義。智慧財產所涵蓋的剛好是機器人和人工智能所無法提供的——模式辨識和判斷力。

如同麻省理工學院經濟學家萊斯特·瑟羅所說：「今天知識和技能已經獨立，成為競爭優勢的唯一來源……矽谷和一二八號公路（在波士頓地區）會在那裡，只不過是因為人才在那裡。除了人才，他們不為別的。」

為什麼這個歷史性的轉移動搖了資本主義？很簡單，人類的頭腦無法大規模生產。當硬體可以大規模製造並銷售時，人類的頭腦不能。也就是說，人們的判斷力將是未來的貨幣。不像其他商品，要創造智慧財產，你必需培養、磨練和教育人類，而那需要數十年個別的努力。

如同瑟羅所說：「所有的其他東西都從競爭方程式中掉落，只有知識成為長期永續的競爭優勢來源。」

例如，軟體將會逐漸變為比硬體重要。當電腦晶片價格繼續下降，它將以貨車計量。但是軟體必需以老舊的方式創造，由人以紙筆，靜坐在椅子上寫出。例如，儲存於你的手提電腦的檔案，其中可能包含有價值的計畫、手稿和資料，那些可能價值數十萬美元以上，但是手提電腦本身僅值數百美元。當然，軟體很容易被複製並大量製造，但新的軟體開發卻無法如此。那需要人類的思想。

依據英國經濟學家哈米許·馬克雷所說：「一九九一年，英國成為第一個從無形出口（服務）賺到的比有形出口多的國家。」

數十年來，美國經濟來自製造業所占的比率大幅下降，與智慧財產相關的部門（好萊塢電影、音樂事業、電玩、電腦、電信等等）卻在激增。這種由商品資本主義到智慧資本主義的轉變是漸進的，由上個世紀就已開始，但每隔十年就會加速。瑟羅寫道：「在依據通貨膨脹調整以後，

從一九七○年代到一九九○年代，自然資源的價格下降了百分之六十。」

某些國家了解這一點。日本在戰後時代的教訓可供參考。日本並無很多的天然資源，但它是世界最大經濟體之一。日本今日的財富，是工業化和人民團結的證明，而不是來自腳下的財富。

不幸地，許多國家並未掌握這個基本事實，也未替他們的國民的未來做準備，反而主要依賴商品。這意味著擁有豐富天然資源的國家，若不了解這個道理，未來將會陷入貧困。

數位差距？

有一些責難資訊革命的聲音認為，在「數位富有」和「數位貧窮」之間（也就是那些能夠接觸到電腦的力量的人和接觸不到的人），我們將會有一個日益擴大的缺口。他們聲稱，這個革命將會擴大社會的斷層，打開新的、將會撕裂社會的貧富懸殊和不平等。

但這只是一個真實問題的狹隘觀點。在電腦運算力每隔十八個月就會倍增的過程，連貧窮兒童也會有機會接觸電腦。同儕壓力和低廉價格，已經對貧窮兒童使用電腦和網路產生激勵。曾有一個教育方案，是提供經費為每一個教室購買一台手提電腦。雖然有良好的意圖，但這個計畫廣泛被認為失敗。第一，手提電腦往往待在角落，未被使用，因為老師往往不知如何使用它。第二，多數學生只是繞過教室的手提電腦，但私下卻已經與朋友們一起在網路上玩遊戲了。

問題不在接觸的機會。真正的問題是工作。就業市場正遭遇歷史性轉變，未來會繁榮興盛的國家將是那些能夠取得這個優勢的國家。

對於開發中國家，策略之一就是利用商品建立健全的基礎，然後以那基礎為跳板，轉移到智慧資本主義。例如，中國已經成功地採納這個兩步驟的過程：中國人建立成千上萬工廠，為世界市場製造產品，但他們用獲利去創造建立在智慧資本主義的服務部門。在美國，主修物理學的博士生，有百分之五十出生於外國（主要是因為美國本身並未培育足夠的優質學生）。這些外國出生的博士生中，多數來自中國和印度。這些學生中，有些回到他們的母國，去開創全新的企業。

入門級工作

這個轉移的受害人之一將是入門級工作。每一個世紀都會引進導致經濟和人民生活的扭曲和錯亂的新技術。例如，在一八五○年，百分之六十五的美國勞動力被迫在農場工作。（今天，只有百分之二·四。）這個世紀也會這樣。

在十九世紀，新一波的移民湧進美國，那時它的經濟快速成長，足以吸納他們。例如在紐約，移民可以在服裝工業或輕工業找到工作。在成長的經濟中，不論教育程度如何，任何願意認真工作的工人，都能找到事情做。那就像是一個輸送帶，從歐洲的貧民窟帶來移民，將他們塞進美國繁榮的中產階級中。

經濟學家詹姆斯·格蘭特（James Grant）曾說：「手與心從田野長期地遷移到工廠、辦公室和學校，都代表生產力的增長……技術的進步是現代經濟的堡壘。當然，過去二百年來都這樣。」

今天，這些工作很多都不見了。還有，經濟的本質也改變了。許多入門級的工作被尋求廉價勞工的公司送到海外。而工廠中舊有的製造工作早就不見了。

但這中間也有很多令人啼笑皆非的情況。多年來，很多人要求公平競爭，沒有偏好或歧視。但如果工作能夠一按鍵就輸出，這個公平的環境現在延長到中國和印度。所以，以往扮演輸送帶，進入中產階級的入門級工作，可以外銷到其他地方。這對海外的工人是好的，因為他們可以受益於公平競爭，但卻造成美國都市貧民區的空洞化。

消費者也會由此受惠。如果有全球性競爭，產品和服務變得較便宜，發貨較有效率。如果只是試圖扶持過時的企業和待遇過高的工作，會造成自滿、浪費和無效率。補貼失敗的行業只會延緩不可避免的事情發生，延遲崩潰的痛苦，事實上也會使事情更糟。

還有令人感到諷刺的事。許多高待遇、高技術服務部門的職缺並未填滿，因為缺乏合格的候選人。教育系統往往未能培育足夠的有技術的工人，所以企業必須面對教育不足的工作隊伍。上市公司渴盼招收教育系統通常並不培育的有技術的工人。即使經濟不景氣，還是有工作找不到

合格的工人。

但有一件事很清楚。在後工業時代經濟中，許多老舊的藍領工廠工作消失是件好事。好幾年以後，經濟學家還在玩弄著「美國再工業化」的構想，直到他們認識到，我們無法將時鐘撥回去。數十年前，美國和歐洲經歷了從以工業為主到服務經濟的轉移，而這個歷史性的變動無法逆轉。工業化的全盛期已過——但是永遠過去了。

取而代之的是，必須努力對那些可以使智慧資本主義最大化的部門，做重新適應和再教育。這將是政府在二十一世紀最困難的任務之一，而且沒有特效藥。一方面，那意味著教育系統的大翻修，讓工人可以再訓練，而高中畢業生不會畢業即失業。智慧資本主義並不等於工作只給軟體程式員和科學家，而是廣闊光譜的各種活動，包含創造力、藝術能力、創新、領導力和分析能力——特別是判斷力。工作隊伍必須接受教育，以面對（而非躲避）二十一世紀的挑戰。特別是，科學課程必須大翻修，教師必須再教育，使他們與未來的科技社會緊密相關。令人洩氣的是，美國有一句老話：「能者，去做事；不能者，去教書。」（Those who can,do.Those who can’t,teach.）(譯注1)

如同麻省理工學院的瑟羅所說：「成或敗，取決於國家是否成功地轉型到未來的人造腦力工業——而非任何特定部門的規模。」

也就是說，創造新一波具有創新精神的創業家，他們將由這些技術的創新來創造出新的事業和新的財富。這些人的精力和活力必須加以釋放。他們必須被允許將新的領導力注入市場。

國家之間的贏家和輸家

不幸的是，很多國家並不走這條路，反而僅僅依靠商品資本主義。但因為商品的平均價格，在過去一百五十年持續下跌，他們的經濟終將隨著時間萎縮，讓世界繞過他們。

這個過程並非無可避免。看看一九四五年德國和日本的例子，當他們的全國人口都接近飢餓時，他們的城市成了廢墟，而國家也崩潰了。僅僅一個世代，他們能再與世界經濟強國並駕齊驅。再看看現在的中國，它以百分之八至百分之十的飛躍成長率，反轉五百年的經濟衰退。一度被

嘲笑為「東亞病夫」的國家，在另一個世代將會晉身已開發國家。

這三個社會之所以傑出，是因為每一個都是具有凝聚力的國家，有勤奮工作的國民，並生產全世界競相購買的產品。這些國家強調教育、使政府和人民成為一體以及經濟發展的重要性。

如同英國經濟學家和新聞人員馬克雷所寫：「舊的成長動力——土地、資本、自然資源——不再重要。土地關係不大，因為工業國家農業增產的食物，可能超過它的需要。資本不再重要，因為只要付出代價，並提出可以產生收入的計畫，國際市場上有取之不盡的資金……這些量化的資產（傳統上使得國家富有），正在被一系列的品質特點（歸結為居住其中人民的品質、組織、動機和自律）取代。我們只要看到在產業、私人服務業和公共部門的人力技術層次日益重要，就能證實這一點。」

不過，並非每一個國家都走這條路。某些國家在無能的領導者的運作下，文化和倫理都破碎而失去作用，無法製造世界其他地方需要的物品。他們不投資於教育，反而投資於龐大的軍隊和武器，去恐嚇人民，以維持特權。他們不投資於基礎建設，以加速國家的工業化，反而涉入貪污並盡力來維持自己的權力，創造了盜賊統治而非菁英領導。

可惜的是，這些腐敗的政府揮霍了西方國家所提供的大部分援助，有多少貪多少。未來學家托佛勒夫婦（Alvin and Heidi Toffler）指出，在一九五○年到二○○○年之間，富有的國家給窮國超過一兆美元的援助，但他們也指出：「世界銀行告訴我們，將近二十八億的人口（幾乎是世界人口之半）仍然生活於相當每日低於二美元的標準。其中，又有大約十一億人在低於一美元的極端或絕對貧窮下苟活。」

當然，已開發國家可以做得更多，去緩解開發中國家的困境，而非僅對此一問題施予口惠。但是一旦所有能做的都做了，最終主要的發展責任還是要來自開發中國家自己的明智領導。這使我們想起諺語所說的：「給我魚，我能吃一天。教我如何釣魚，我將永遠有魚吃。」也就是說，不要只是補助開發中國家，重點必須放在教育，並幫他們發展新的工業，使他們能夠自給自足。

占科學的便宜

開發中國家將可能獲取資訊革命的好處。一般而言，他們可以在很多方面直接超越已開發國家。在已開發世界，電話公司必須花很大的代價，耐心地拉線到每一個家庭。但開發中國家不需在全國加設電話線，因為手機科技不需任何道路或基礎建設，就能在鄉村良好運作。

還有，開發中國家的優勢在於，他們不需重新建造老舊的基礎建設。例如，紐約和倫敦的地下鐵已是百年老舊，亟需整修。今天，整修這些老朽的系統，花費要比新建一個系統更多。一個開發中國家可以決定要以最新科技（獲得金屬、建築技術和科技等重大改進的好處），創設一個明亮全新的地下鐵系統。一個全新的地下鐵系統，將比百年前的系統成本低。

例如，中國就能得益於西方重建城市所犯的錯誤。結果，北京和上海的建設，只占西方主要城市建設成本的一小部分。今天，北京為了服務城市中爆發的人口，受益於西方所創造的所有電腦科技，正在興建一個世界上最大、最先進的地下鐵路系統。

網際網路是開發中國家走向未來的一條捷徑。它可以跳過西方所犯的錯誤（特別是在科學方面）。以往開發中世界的科學，必須依賴原始的郵政系統傳遞科學期刊，而那些期刊通常需要好幾個月到一年才能到達（如果接到的話）。這些期刊很昂貴，也很專門，所以只有最大的圖書館才付得起。要與西方的科學家合作幾乎不可能。你必須獨立有錢，或野心很大，去取得西方大學的一個職位，在著名的科學家手下工作。現在，無名的科學家也有可能在一瞬間透過網路取得來自世界任何地方的科學研究報告，而且免費。還有，透過網路，也有可能與從未謀面的西方科學家合作。

有待把握的未來

未來非常開放。如同我們提過的，當矽的時代成為過去，而火炬傳到下一代的發明家時，矽谷可能在未來數十年內，成為下一個鐵鏽地帶（Rust Belt，指一九八○年代的美國中西部和東北部）。哪一個國家會領導未來？在冷戰時代，超級強權是那些可以在全球施加影響力的國家。但蘇聯的解體已經清楚地表明，上升到頂端的國家將是那些建立經濟，而經濟又回頭培育和支持科學和技術的國家。

所以，誰是未來的領導者？就是真正認清這個事實的國家。例如，雖然美國學生經常在主要學科如科學和數學的世界排名遙遙落後，但它仍在科學和技術方面維持支配地位。例如，一九九一年的學科能力測驗顯示，十三歲的美國學童，數學排名第十五，科學排名第十四，只比約旦學生好（它兩項都排名十八）。以後每年舉辦的測驗都證實了這些令人傷心的排名。（我們也必須指出，這個排名大致與各國學生上課日數相對應。排名第一的中國，每年平均上課二百五十一日，而美國平均上課一百七十八日。）

看來有點不可思議，雖然排名不佳，美國在國際間的科學和技術方面繼續表現良好，但我們終將發現，美國的很大一部分科技來自國外——以讓別的國家「人才外流」（brain drain）的形式。美國有一個祕密武器：H1B簽證——所謂天才簽證。如果你能顯示出你有特殊才能、資源或科學知識，你可以跳到排隊隊伍的前面，取得H1B簽證。這個做法持續地彌補了美國的科學排名。例如，矽谷大約有半數人是外國出生，其中許多來自台灣和印度。在全美國，百分之五十的物理博士生是外國出生。在我服務的紐約市立大學，這個數字幾近百分之百是外國出生。

有一些國會議員曾經試圖取消H1B簽證，他們聲稱，因為它搶走了美國人的飯碗。但他們不了解這種簽證所扮演的角色。通常，並沒有合格的美國人可以取得矽谷最高階的工作——我們常會發現結果它們並未填滿。當德國前總理格哈德·施洛德（Gerhard Schroeder）試圖在德國通過類似H1B簽證的移民法時，這個事實非常明顯，但這個辦法被那些聲稱它會奪走德國當地人工作權的抗議者給打敗了。同樣地，批評家未能了解通常並無德國人能填補這些職缺，所以它們就一直空著。這些H1B移民並未奪走在地人的工作機會，他們創造了整個新行業。

但是這種H1B簽證只是暫時性的權宜之計。美國不能繼續依賴外國科學家，當中國和印度經濟改善時，他們之中很多人開始回歸。所以人才流入無法永續。這意味著美國最終必須徹底翻修它過時的、僵硬的教育系統。現在，準備很不充分的高中生成群湧進就業市場和大學，創造出一種停滯狀態。雇主不斷地抱怨一個事實——他們必須花一整年的時間，去訓練新雇用的員工，使他們可以全速工作。而大學也有負擔，他們必須開設一層新的補救課程，來補償表現不佳的高中教育系統。

幸而，我們的大學和企業，總算在彌補高中教育缺失這方面做得不錯，

但這是時間和人才的浪費。為了使美國維持競爭力直到未來，中小學教育系統，必須有根本的改變。

公平的說，美國仍然擁有重要的優勢。我有一次在紐約的自然科學博物館參加一個雞尾酒聚會，遇見一個來自比利時的生物科技創業家。我問他，比利時也有自己充滿活力的生物科技，為什麼他要離開。他說，在歐洲，你通常不會有第二次機會。因為人們都認識你和你的家庭，如果你犯了一次錯誤，你可能就完了。你的錯誤往往跟著你，不論你是誰。但是在美國，他說，你可以不斷地再發展自己。人們不在乎你的祖先是誰，他們只在乎你現在能為他們做事。他說，這一點令人耳目一新，也是其他歐洲科學家遷移到美國的原因之一。

新加坡的教訓

西方有一句話說：「吱吱響的輪子，會得到潤滑油。」但在東方，卻另外有一句：「冒頭的釘子挨榔頭。」兩種表達剛好相反，但它們抓住了東西方思想的某種神韻。

在亞洲，學生的測驗成績往往高過西方對手許多。不過，許多的那種學習只是課本的學習和記誦——那只能帶你到某一層次。要到達高層次的科學和技術，你需要創造力、想像力和創新，而這些東方教育並不培養。所以，在複製西方首先生產的商品方面，雖然中國遲早會追上西方，但在夢想新產品和新策略的創造性過程方面，它仍將落後西方好幾十年。

我曾一度在沙烏地阿拉伯的會議上演講，在那兒另有一場特別演講的主講人，是一九五九年到一九九○年擔任新加坡總理的李光耀。他在開發中國家中有點像是搖滾明星，因為他協助創建了現代化國家新加坡——它列名於科學頂尖國家中。事實上，如果計算人均國內生產總值，新加坡是全世界第五富有的國家。聽眾耐心地傾聽這個傳奇人物所講的每一個字。

他緬懷戰後的早期時光，當時新加坡被視同一潭死水，而以仿冒、走私、酒醉水手以及其他名譽不佳的活動出名。不過，他的一群助手夢想有一天，這個小海港可與西方匹敵。雖然新加坡沒有重要的自然資源，他的最大資源就是它的人民，他們都勤奮工作，也具有半熟練技術。他

的團隊開始踏上一趟令人印象深刻的旅程，把這個睡夢中的荒僻國度，在一個世代之內，轉變為科學的發電所。那可能是歷史上最有趣的一個社會工程案例。

他和他的黨開始進行革新整個國家的系統過程，強調科學和教育，並專注於高科技產業。只不過數十年，新加坡產生了很大的一群經過高度教育的技術人員，他們使這個國家有可能成為電子、化學及生化設備的領先出口國。二○○六年它製造了全世界百分之十的電腦晶圓。

他承認，在國家現代化過程中，存在一些問題。為了強化社會秩序，他們實施嚴厲的法律，懲罰範圍廣泛，從街上吐痰（施以鞭刑）到販毒（處以死刑）都在內。但他也注意到一件重要的事。他發現，頂尖的科學家們渴盼訪問新加坡，卻只有少數人留下。後來，他發現了一個原因：這裡沒有文化設施和他們喜聞樂見的事物。這使他有了下一個構想：用心培育補助所有現代國家的文化外緣（芭雷公司、交響樂團），使得頂尖科學家願意在新加坡生根。幾乎在一夜之間，文化團體和活動在全國各地冒出，吸引科學菁英在那裡安定下來。

其次，他也認識到，新加坡的兒童盲目地跟著教師念，不會挑戰傳統的智慧，也不會去創造新觀念。他認為，若是培育的科學家只能追隨別人，東方會永遠落後於西方。所以他決心推動教育革命：有創造力的學生將被挑選出來，容許他們以自己的速度追求夢想。他體認到有些像比爾‧蓋茲（Bill Gates）或史蒂夫‧賈伯斯（Steve Jobs）的人，會被新加坡令人窒息的教育系統毀掉，他要求新加坡的學校教師，有系統地指認出未來的天才——那些可以用他們的科學想像活絡經濟的人。

新加坡的教訓不一定適用於所有的人。那是一個可由少數的夢想家執行有秩序的國家建設的小地方。而且也不是每一個人都願意因為在街上吐痰就被鞭打。無論如何，它顯示出你能做什麼——如果你打算有系統地在資訊革命中跳到領先地位。

未來的挑戰

我有一段時間，在普林斯頓大學高等研究院做研究，並曾與弗里曼‧戴森共進午餐。他開始回憶起自己漫長的科學生涯，然後提及一個令人不安的事實。戰前，他是英國的一個年輕大學生，他發現許多英國的聰明

菁英逃避「硬科學」（如物理、化學），而喜歡待遇優厚的財務和銀行工作。前一代創造了財富（以電子和化學工廠，及發明新的電機機器），下一代則耽溺於享受他人的按摩和管理別人的金錢。他嘆息說，那是大英帝國衰弱的訊號，如果英國的科學基礎破壞了，就無法維持世界強權的地位。

然後，他說了一些引起我注意的事。

他說，他來美國以後也看到了同樣的問題。普林斯頓最聰明的心智，不再對付物理和數學難題，而被吸引到投資銀行之類的行業。他認為，當社會上的領袖不再支持使他們的社會變得更偉大的科學和技術研究時，這同樣是一個衰敗的訊號。

這就是我們未來的挑戰。

譯注1：這句話事實上出自蕭伯納（George Bernard Shaw）的《人與超人》（Man and Superman）。

第八章　人類的未來——行星文明

當今世上的人類，將可能被認為，是活在人類歷史上最出色的三、四個世紀之中。

——朱利安‧西蒙（Julian Simon）

沒有遠見，人就墮落。

——《箴言》二十九：十八

本章重點

文明量表 / 第一、二、三型文明 / 從零型到第一型

恐怖主義和獨裁國家 / 第二型文明 / 第三型文明

搜尋外星智能 / 新分類 / 以「熵」為文明分級 / 從主宰自然到保護自然

最危險的轉移 / 搜尋智慧 / 未來的關鍵：智慧 / 未來的運貨列車

在神話中，眾神住在神聖輝煌的天堂，超越於凡人的瑣碎事務之上。當北歐神話中的主神兼死亡之神歐丁，為了名譽與永恆的榮耀在華海拉殿（Valhalla）接待戰亡將士的英靈之時，希臘的諸神正在天庭轄區的奧林匹克山嬉戲著。但如果我們的目標是在世紀末年擁有神的力量，到了二一○○年，我們的文明會有何面目？所有這些科技創新，會將我們的文明帶到何方？

本書所描述的所有科技革命，都朝向一點：行星文明的創造。這可能是人類歷史上最大的轉移。事實上，現在活著的人，是曾經立足於地球上最重要的人類，因為他們將決定人類是要達到這個目標，或沉淪進入混亂。自從我們的第一個祖先在大約十萬年前從非洲冒出來，曾經在路地上行走的人已經歷約五千個世代。在這些人中，只有生活於本世紀的人會決定人類的終極命運。

除非有大災難發生，或愚蠢行為造成大禍，無可避免地，我們將會集體進入這個歷史階段。透過對能源歷史的分析，我們最能清楚地看到這一點。

文明量表

當專業歷史學者撰寫歷史時，他們透過人類經驗和愚行的鏡子，也就是透過國王和皇后的豐功偉業、社會運動的興起以及新觀念的傳播去審視。相對地，物理學家以完全不同的眼光看歷史。

物理學家透過消耗的能量來為萬物分級——連人類文明也不例外。應用於人類歷史，我們發現經歷好幾萬年，我們的能量局限於五分之一馬力（我們徒手的力量），因而在小部落中遊蕩、在惡劣的環境中搜尋食物，並過著遊牧的生活。有很長的時期，我們與狼群沒有區別。沒有留下書寫記錄，只有在營火旁邊以故事代代口耳相傳。生命短暫而殘酷，平均壽命只有十八到二十歲。你的財富就是所有你能背著的東西。多數活著的日子，都要忍受飢餓的折磨。死後也沒有留下任何活過的蹤跡。

但在一萬年前，一個不可思議的事件發生了，它使文明開始動了起來：冰河時代結束了。基於我們仍然不了解的理由，數千年的冰川作用結束了。這為農業的興起創立了條件。馬和牛很快地被馴養，使我們的能量增至一馬力。現在一個人有能量可以耕種數畝農地，生產多餘的能量來支持快速增加的人口。隨著動物的馴化，人類不再主要仰賴狩獵動物過日子，而第一個穩定的村莊和城市開始從森林與平原中興起。

農業革命創造的過剩財富，使精巧的維持和擴增財富的新方法出現。數學和書寫被創立來計算財富，也需要日曆來記錄何時播種和收成。另外也需要抄寫員和記帳員來記錄這些盈餘和稅收。這個過量的財富最終導致大規模軍隊、王國、帝國、奴隸和古代文明。

隨著工業革命的來臨，下一個革命發生於三百年前。突然間，個人財富的累積，不限於他的手和牛馬，而來自機器的產品——透過大規模製造，可以創造驚人的財富。

蒸汽機可以推動機器和火車頭，所以財富可以由工廠、磨坊和礦坑創造出來，而非只限於田野。農民逃離經常發生的飢荒，也對田野中的辛苦

工作厭煩，湧進城市，創造了工業的工人階級。鐵匠和馬車製造師傅最終被汽車工人替代了。隨著內燃機的來臨，現在一個人可以控制好幾百馬力。人的壽命開始延長，美國一九○○年達到四十九歲。

終於，我們處身於第三波，財富由資訊產生。國家財富的衡量，現在是依據環繞於世界的光纖纜線和衛星上，最終飛舞於華爾街及其他財務中心的電腦螢幕上的電子來衡量。科學、商業和娛樂，以光速移動著，隨時隨地給我們無限的資訊。

第一、二、三型文明

這個呈指數增加的能量，會如何在未來的幾百到幾千年繼續下去？當物理學家嘗試分析文明時，我們依照它消耗的能量來分級。這個分級方式是由俄國的天文物理學家尼古拉·卡達謝夫，於一九六四年率先提出。他的興趣是探索夜空，搜尋外太空高等文明送來的訊號。

他對於像「外星人文明」這種含糊而又錯誤定義的名詞並不滿意，所以他採用一種量表來引導天文學家的工作。他認為外星人文明依據他們的文化、社會、政府等等可能有所不同，但有一件事他們一定要遵從：物理法則。而且以地球為基準，有一件事我們可以觀察和衡量，能將這些文明區分為不同類型：它們的能量的消耗量。

所以他擬定了三個理論類型：第一型是行星文明（planetary），消耗陽光落在行星上的碎片，或約10^{17}瓦。第二型是恆星文明（stellar），消耗太陽散發的所有能量，或約10^{27}瓦。第三形是星系文明（galactic），消耗數十億恆星的能量，或約10^{37}瓦。

這個分類的優點是：我們可以將每一個文明的力量量化，而非只是含糊而不確定的大致說法。由於我們知道這些天體的力量輸出，當我們搜尋天空時，我們可以對它們每一個設定一個數量限制。

每一類型文明之間相差一百億倍：第三型文明消耗的能量比第二型文明大一百億倍（因為一個星系有大約一百億顆恆星或稍多），而第二型文明消耗的能量又比第一型文明大一百億倍。

依照這個分類，我們現在的文明是零型。我們甚至還上不了這個量表，

因為我們從死亡的植物取得能量，也就是來自石油和煤炭。卡爾‧薩根依這個分類推論，對我們在這個宇宙天平上的等級，獲得較為精確的估計。他的計算顯示我們事實上是一個○‧七型文明。

在這個量表上，我們也能將我們看過的科幻小說中的文明歸類。一個典型的第一型文明，將是《重返二十五世紀》（Buck Rogers in the 25th Century）中的巴克‧羅傑斯（Buck Rogers）或飛俠哥頓，在那裡整個行星的能量來源都已開發。他們能夠控制行星的能量來源，所以他們能控制或照自己的意願變更天氣、掌控颶風的力量或在大洋中建立城市。雖然他們可以在火箭中漫遊太空，他們的能量輸出仍然大部分局限於一個行星。

第二型文明將包含《星艦迷航記》的行星聯盟（但沒有曲速引擎），能夠在附近的一百個星球殖民。他們的科技剛好可以操縱一個恆星的整個能量輸出。

第三型文明可能是《星際大戰》傳奇中的帝國，或者是《星艦迷航記》系列中的博格人（Borg），兩者都在一個星系中的大部分地區殖民，涵蓋數十億個恆星系統。他們可以任意漫遊整個星際太空。

（雖然卡達謝夫的量表是以行星、恆星和星系為基礎來分類，我們應當指出，還有第四型文明的可能，它將從星系以外的來源取得能量。唯一已知的星系之外的能量來源是暗能量，它占已知的宇宙中所知的物質和能量的百分之七十三，而恆星和星系的普通物質世界只占宇宙的百分之四。(譯注1)一個可能的第四型文明候選者，很可能是《星艦迷航記》系列中像神的Q，它的力量來自星系之外。）

我們可以用這個分類來計算，何時我們可以達到這些文明類型。依照過去數個世紀的平均數來看，我們可以合理地假定世界文明的生產總值（GDP）每年成長百分之一。依據這個假設，大約要花二千五百年才能從一個文明進展至下一個。如果成長率是百分之二，轉移的時間只需一千二百年。

但，我們也可以計算我們的地球要花多久才能達到第一型文明。儘管有經濟上的衰退和膨脹，激增和降級，我們可以根據經濟成長的平均數字，以數學方法估計出，我們將於大約一百年內達到第一型文明。

每一次我們打開報紙，就會看到從零型轉移到第一型的證據。許多頭條標題，都能追溯到第一型文明在我們眼前誕生的劇痛。

☆網際網路是第一型行星文明電話系統的開始。歷史上第一次，某一大陸上的一個人，可以不費力地和另一個大陸的人交換無限量的資訊。事實上，許多人已經開始覺得，他們與世界另一邊的某個人，比隔壁的鄰居還有更多共通點。在更多國家埋設更多光纖纜線，並發射更多通訊衛星以後，這個過程只會繼續加速。甚至如果美國總統試圖禁止網路，他只會聽到笑聲。現在全世界已有將近十億台個人電腦，而且大約四分之一的人至少曾經上網一次。

☆少數語言（由英語帶頭，然後是中文）快速浮現成為未來的第一型語言。例如，在全球資訊網中，百分之二十九網民以英文上網，其次有百分之二十二以中文上網，百分之八用西班牙文，百分之六用日文，百分之五用法文。英語已經是實質的科學、財務、商業和娛樂的行星語言。英語也是地球上最多人學習的第二語言。不論我旅行到哪裡，我都會發現英語以通用語言浮現。例如，在亞洲，當越南人、日本人和中國人一起開會時，他們用英語溝通。依據曾任職阿拉斯加大學母語中心的麥克·克勞斯（Michael E.Krauss）所說，目前，地球上有六千種語言在使用中，而其中有百分之九十預期將會在未來數十年內消失。電信革命加速了此一過程，連居住在最偏遠地區的人都暴露於英語之中。當他們的社會被進一步整合進入世界經濟時，這也將加速經濟發展，因而提高生活水準和經濟活動。

☆有些人會惋惜，某些含有古音的語言不再有人會說的事實。但另一方面，電腦革命將保證這些語言不會消失。說母語的人會將他們的語言和文化，加入網路，在其中永遠存在。

☆我們正在見證行星語言的誕生。歐盟和其他貿易體的興起代表第一型經濟的浮現。歷史上，歐洲人民為了世仇而與鄰人打鬥已有數千年歷史。即使在羅馬帝國衰亡後，這些部族仍會互相殘殺，最後變成歐洲的世仇國家。但今天這些結怨的對手卻突然連結在一起組成歐盟，代表地球上最大的財富集中。這些國家突然捐棄世仇的原因，是要與簽訂北美自由貿易協定（NAFTA）的經濟強國競爭。未來，會有更多國家認識

到，除非它們加入有利的經濟體，否則無法維持競爭力，因而我們會看到更多經濟體的形成。

☆當我們分析二○○八年的經濟大衰退，我們看到鮮明的證據。在短短數日內，震波從華爾街發出，席捲倫敦、東京、香港和新加坡的財政大廳。今天，如果不了解影響世界經濟的趨勢，就不可能了解單一國家的經濟。

☆我們看見了一個全球性中產階級的興起。數億的中國、印度及其他國家的人民加入了這個階級，那可能是過去半個世紀最大的社會劇變。這個團體對於影響全球的文化、教育及經濟趨勢相當了解。這個全球性的中產階級注意的，不是戰爭、宗教或嚴格的道德規範，而是政治和社會的穩定，以及商業利益。會強烈影響他們先人的意識形態和族群情感，對他們影響較小——如果他們的目標是擁有一棟郊區的雙車庫房子。當他們的祖先可能慶祝子女出發參戰的日子，他們現在最關心的事之一，就是把他們的子女送進好的大學。而對那些忌妒地看著別人升級的人，將會納悶何時他們也會有那麼一天。前麥肯錫公司合夥人大前研一寫道：「無疑地，人們將會環顧周邊，並自問，為什麼他們不能擁有別人擁有的。同樣重要的，他們也會開始問，為什麼他們過去不能擁有它。」

☆經濟（而非武器）是評判超級強權的新標準。歐盟和北美自由貿易協定的興起，又強調了一個重要的論點：顯然，隨著冷戰的結束，世界強權能以經濟力量為主，維持其支配性地位。核子戰爭實在太危險而不能用，所以經濟力量成為國家命運的主要命脈。蘇聯的瓦解因素之一，就是與美國作軍備競賽產生的經濟壓力。（如同雷根總統的顧問們一度評論說，美國的策略就是讓蘇聯耗盡而走向蕭條。那就是，增加美國的軍事支出，導致經濟規模只有美國一半的蘇聯，必須讓人民挨餓才能跟得上。）未來，超級強國顯然能僅透過經濟力量維持其地位，而經濟力量又根源於科學和技術。

☆一個植基於青年文化（搖滾樂和青年時尚）、電影（好萊塢巨片）、高級時尚（昂貴物品）和食物（大眾市場和速食連鎖店）的行星文化已經浮現。不論你旅行到哪裡，你都能發現音樂、藝術、和時尚的相同文化趨勢的證據。例如，好萊塢在預估一個潛在大片的成功情形時，小心地將全球性訴求的相關因素列入。有跨文化主題（如動作片或浪漫片）

的電影，加上國際知名明星的包裝，是好萊塢的票房保證，這也是行星文化浮現的證據。

第二次世界大戰以後，我們第一次看到整個年輕世代，擁有可供支配的收入，改變了流行文化。從前，兒童一旦進入青春期，就被送到田野與父母一起做苦工。（這是三個月暑假的由來。在中世紀，兒童一旦年齡夠大，就必須在夏季下田幫忙做苦工。）但是由於經濟繁榮起來，戰後嬰兒潮的一代離開了田野，走上街頭。今天我們看到一個接一個國家，當經濟發展使青年擁有大量可自行支配的收入時，發生了相同的情況。最後，世界上多數人進入中產階級，收入的提升會使青年的收入水漲船高，助長了這個行星青年文化的不朽。

搖滾樂、好萊塢電影等等，事實上是智慧資本主義取代商品資本主義的絕佳例子。在未來數十年之內，機器人仍將無法創造能夠引發國際觀眾興奮的音樂和電影。

時尚世界也正在發生同樣的情形，少數品牌擴及全世界。高級時尚，曾經是貴族和極端富有的人的專利，在更多人進入中產階級，並渴望享受某些富人的奢華時，現在正快速擴散到全世界。高級時尚不再是特權菁英的專屬領域。

但是，行星文明的浮現，並不意味著地方性的文化或風俗習慣會被掃除。人們反而會成為雙文化人。一方面，他們會保留地方性文化傳統（而網路則保證地區性的風俗會永遠存活）。世界的豐富多樣性文化會繼續在未來繁榮下去。事實上，某些鮮為人知的地方性文化特點，反而可以藉助網路散播到全世界，獲得世界性的觀眾。另一方面，人們會熟悉影響世界文化的變化趨勢。當人們與來自其他文化的人溝通時，他們會把全球文化放在心裡。這在全球的許多菁英之間已經發生：他們說方言，並遵循地方習俗，但當在與異國人士打交道時，使用英語並遵循國際慣例。這就是正在浮現的第一型文明的模式。地方性文化繼續繁盛，與較大的全球性文化共存。

☆新聞正日益全球化。有了衛星電視、手機、網路等等，國家變得不可能完全控制並過濾新聞。素人影片從全球各地出現，無從檢查。但戰爭和革命爆發時，毫無修飾的影片，在事件發生時，立即在全球同步播出。過去，十九世紀的強權相對容易地貫徹他們的價值並操控新聞。今

天，這一點仍有可能，但由於技術進步，其基礎已經縮小。還有，由於全球教育水準的提高，世界新聞的觀眾也大量增加。今日的政治家在考慮他們的行動後果時，必須納入世界各方面的意見。

☆運動（過去對融合部族和國家認同極為重要）現在正在融合全球性認同。足球和奧運會正在興起，成為最熱門的全球運動。例如，二ㄧㄧ八年奧運廣泛被解釋為中國人嶄露頭角的聚會，他們在好幾世紀的孤立之後，想要取得正確的世界性文化地位。這也是洞穴人原則的一個例子——因為運動不但是高接觸，也能進入高科技的世界。

☆環境威脅也以全球規模進行辯論。各國認識到他們創造的污染，會越過邊界形成國際性危機。當南極上空的臭氧層出現一個巨大的洞口時，我們第一次看到這一點。因為臭氧層可以防止來自太陽的有傷害性的紫外線和X光到達地面，各國聯合起來，限制用於冰箱和工業系統的氟氯化碳的製造和消費。〈蒙特婁議定書〉（Montreal Protocol）於一九八七年簽訂，成功地降低了破壞臭氧的化學藥品的使用。基於此一國際性的成功，多數國家於一九九七年接受〈京都議定書〉（Kyoto Protocol）來解決全球暖化的威脅——那甚至是對全球環境更大的威脅。

☆觀光是地球上發展最快速的行業之一。在人類歷史的大部分時間中，人們一輩子都住在出生地附近數英里內，是很平常的事。肆無忌憚的領導者很容易操縱人民——他們與別人沒有或很少接觸。但在今日，一個人可以用很少的預算就環遊世界。今日背著背包在環遊世界時住進青年旅館的年輕人，將會成為明日的領袖。某些人批評說，觀光客對在地文化、歷史和政治，只有皮毛的了解。但我們必須認定這種接觸的影響——在過去，相隔甚遠的文化之間的接觸幾乎不存在（除了往往以悲劇收場的戰爭）。

☆同樣地，國際旅行價格的降低，也加速各類人民之間的接觸，使得戰爭較難進行，也散布了民主的理想。激起國際間敵意的因素之一，就是人民之間的誤解。一般而言，互相親近的國家之間很難發生戰爭。

☆戰爭本身的性質也正在改變，以反映這個新的現實。歷史已經顯示，兩個民主的國家不會發動戰爭互相對抗。過去幾乎所有的戰爭，都是在兩個不民主的國家之間，或一個民主和一個不民主的國家之間進行。一般而言，戰爭的狂熱會被把敵人妖魔化的煽動家迅速激起。但在民主國

家，有活躍的媒體、反對黨、和會恐懼在戰爭中失去一切舒適生活條件的中產階級，要激起戰爭的熱情相當困難。有了存疑的媒體和要求知道孩子為何要參戰的母親，戰爭的熱情難以升高。

☆未來還是會有戰爭。如同普魯士兵學家卡爾‧馮‧克勞塞維茲（Carl von Clausewitz）所說，「戰爭是政治的另一種手段。」雖然我們仍然會有戰爭，隨著民主散布到全世界，戰爭的性質也會改變。

當世界富裕起來，人們會有較多損失時，戰爭就有了較難推動的另一個理由。政治學家愛德華‧魯瓦克（Edward Luttwak）曾經寫道，今日家庭變小，戰爭較難進行。過去，每個家庭有十個左右的孩子；長子繼承農場，而較小的兄弟姊妹則加入教會、軍隊或到其他地方追求財富。今天，典型的家庭只有平均一‧五個孩子，並無過多的孩子輕易去填補軍隊和教士職位。因此，戰爭遠較以前難以進行，特別是在民主國家和第三世界的游擊隊之間。

☆在二一○○年，國家會弱化，但仍然存在。我們仍然需要國家來通過法律，並解決地方性問題。不過，當經濟成長的引擎變成區域性，進而變成國際性時，國家的力量和影響力將會大幅降低。例如，在十八世紀晚期到十九世紀初期，為了強化通用貨幣、語言、稅法和有關貿易和專利的規章，國家有其需要。封建法律和傳統，對自由貿易、商業和財務的進步有妨礙，它們很快地被國家政府掃除。正常情況下，這個過程需要一個世紀左右，但當鐵血宰相俾斯麥（Otto von Bismarck）於一八七一年鑄造了現代德國時，我們見識了一個加速版本。同樣地，朝向第一型文明邁進也改變了資本主義的性質，而且經濟的力量也漸漸地從國家政府，轉移到區域性權力和貿易體。

這並不必然意味著會出現世界政府。行星文明能夠以很多方式存在。顯然國家政府將會失去一些相關權力，但是哪一種力量將填補這個真空，則取決於許多難以預測的歷史、文化和國家的趨勢。

☆疾病將作全球性控制。在古代，致命的疾病事實上並沒有多危險，因為人類人口實在太少。例如，無法治療的伊波拉病毒，可能是一種僅僅在少數村莊傳染數千年的病毒。但是文明快速擴充進入以前無人居住的地區，而城市的興起，更意味著某種類似伊波拉的疾病，必須非常小心地監控。

當城市人口達到數十萬至一百萬，疾病可能快速散布，並產生真正的傳染病。反諷的是，黑死病（出血性鼠疫）可能殺死了半數歐洲人口的事實，也許是進步的指標，因為人口到達會傳染的關鍵性大數量，還有輸送道路把全世界的古代城市連接起來。

最近爆發的H_1N_1流行性感冒，也可算是我們進步的權衡。此一疾病可能發源於墨西哥城，經由噴射機旅行，迅速傳遍世界。更重要地，只花大約一個月時間，就完成病毒的基因排序，然後研發出可供數億人使用的疫苗。

恐怖主義和獨裁國家

不過，有一些團體本能地抗拒朝向第一型行星文明的趨勢，因為他們知道它是進步的、自由的、科學的、繁榮的和教育的。下列這些力量可能並未察覺這個事實，並且無法說出它的存在，但它們事實上奮力掙扎，反對朝向第一型文明的趨勢，它們是：

☆伊斯蘭恐怖主義者，寧可回到一千年前的十一世紀，而非生活於二十一世紀。他們無法將對這個潮流的不滿表達清楚，但從他們的聲明判斷，他們寧可居住於神權國家，在那裡科學、個人關係和政治都服從於嚴格的宗教法令。（他們忘記了，從歷史來看，伊斯蘭文明的偉大和科學與技術的力量，只有在容忍新觀念時才會發生。這些恐怖分子並不了解伊斯蘭過去的偉大根源。）

☆獨裁國家依賴愚民政策，使人民不了解國外世界的財富和進步。一個鮮明例子是，二○○九年震動伊朗全國的示威，政府試圖鎮壓示威者的觀念，而示威者在奮鬥過程使用推特和Youtube向世界傳遞他們的訊息。

過去，人們說「筆比刀劍更有力」。未來，比刀劍更有力的將是晶片。

赤貧國家北韓的人民之所以不反抗，理由之一是他們被隔絕於世界之外，因而也相信全世界的人都在飢餓中。部分原因在於他們並未認識到沒有認命的必要，因而繼續忍受難以置信的苦難。

第二型文明

數千年後，社會進入第二型狀態時，將會永遠存在。科學所了解的一切都無法毀滅第二型文明。因為它將長期控制天氣，冰河期將可避免或改變。流星和彗星將能加以轉向。即使他們的太陽變成超新星，人們可以逃到另一個恆星系統，或者避免他們的恆星爆炸。例如，如果他們的太陽變成紅巨星（red giant），他們將可能讓小行星繞著他們的行星，以彈弓效應移動行星遠離太陽。

第二型文明可能開發恆星輸出的全部能量，方法之一就是創造一個巨大的球體將它包圍，來吸收所有恆星發出的光芒。這就是所謂戴森球體（Dyson sphere）。

第二型文明可能處於和平狀態。因為太空旅行實在非常困難，人們將停留在第一型文明很多世紀，以足夠的時間來解決社會內部的分歧。到了第一型文明發展到第二型的狀態時，他們不但必須在整個太陽系殖民，還要到附近的恆星（也許距離數百光年）殖民，但不會有很多恆星。他們仍將被光速限制著。

第三型文明

進入第三型狀態以後的文明，將已經探索過星系內的多數地方。要探訪數千億顆行星，最方便的方式，就是送出能自我複製的機器人，去探索整個星系。馮紐曼探測器（von Neumann probe）是一個可以無限複製自己的機器人，它降落在一個月球（因為它不會生鏽和腐蝕），以月球上的泥土製造一個工廠，在其中複製成千上萬個自己。每一個複製品又發射到其他遙遠的星球系統，然後又複製數千個複製品。以這樣一個探測器開始，我們很快地創造出無數個可以自我複製的探測器，以接近光速擴展，在十萬年內製作出整個銀河星系的天體圖。由於宇宙有一百三十七億年歷史，這些文明仍有足夠的時間可以興起和衰亡——這種快速的指數性成長，也是病毒在人體中散布的機制。

不過，還有一種可能。文明發展到第三型文明時，它的人民有足夠的能量資源可以探究「普朗克能量」或10^{19}十億電子伏特——在此能量下，時空變成不確定。「普朗克能量」是我們最大的粒子加速器（日內瓦的

大強子對撞機）所能產生能量的一千兆倍。理論上，在此能量下，時空的結構會解體，創造出一些很小的入口，可能由此進入另外一個宇宙，或時空中的另一點。要管控如此巨大的能量，需要一個難以想像的巨大規模的機器，但如果成功，它們將會造成可能的捷徑以通過時空結構——可能是透過壓縮空間，或通過蟲洞。假設他們能克服一些難以對付的理論和實際的障礙（如管控足夠的正能量和負能量，並除去不穩定），我們可以相信，他們將能在整個星系殖民。

這又不免使許多人想到，為什麼他們不來訪問我們。批評家問：他們在哪裡？

一個可能的答案是：或許他們已經來了，但因我們太過原始而注意不到他們。自我複製的馮紐曼探測器將是探測星系的最實際方式，但它們不一定要很巨大。由於奈米科技的革命性進步。它們可能只有數英吋長。它們可能以樸素的樣子出現，但由於我們找錯對象，期待巨大星艦從外太空帶來外星人，所以不認得它們。更可能的是，探測可能是全自動式（部分有機、部分電子），完全不包含任何外星人。

而且，當我們終於遇上了來自太空的外星人，我們可能很意外，因為他們早就使用機器人、奈米科技和生物科技改變了他們的生物體。

另一個可能是：它們已經自我毀滅。如同前面提及的，從零型轉變到第一型是最危險的，因為我們仍然有過去所有的野蠻主義、基本教義派、種族主義等等。有可能某一天，當我們訪問其他恆星系統時，我們會發現零型文明轉移到第一型時失敗的證據（例如，那裡的大氣太熱，或放射線太強，無法支持生命）。

搜尋外星智能

目前，世人確實並未察覺正在邁向第一型行星文明，也沒有這個歷史性轉移正在進行的集體自我感受。如果你做一個調查，某些人可能隱約感知全球化的過程，但除此以外並未意識到我們正朝向一個特定的目標。

如果我們發現了外太空有智慧生命的證據，所有這些可能突然改變。那時，我們將立刻察覺我們的科技層級與這些外星文明的關連。特別是科學家，將會特別想知道這個外星文明能掌握哪一類科技。

雖然我們沒有把握，但鑑於我們的科技進步速度極快，我們有可能在這個世紀內，偵測到太空中的先進文明。

兩個趨勢使得此一預測成為可能。第一是發射專門為搜尋小型、多岩石的太陽系以外行星而設計的衛星——對流旋轉和行星凌日觀測衛星與克卜勒衛星。克卜勒預計將可在太空找到高達六百顆小型又類似地球的行星。一旦這些行星被找到，下一步就是搜尋來自這些行星的智慧排放物。

二○○一年，微軟億萬富翁保羅‧艾倫開始捐增基金（至今已超過三千萬美元），以啟動被暫停的外星智能搜尋計畫（Search for Extraterrestrial Intelligence,SETI）。這將大量增加在舊金山北方帽子溪（Hat Creek）天文台的無線電望遠鏡。艾倫望遠鏡陣列完全運作時，將有三百五十個無線電望遠鏡，成為全世界最先進的同類設施。過去天文學家在搜尋智慧生物時，檢查過的星星不到一千顆。新的艾倫陣列，可將此一數字增加一千倍，達到一百萬顆。

雖然，近五十年來科學搜尋來自先進文明的訊號一無所獲，只有最近的SETI增添了兩項亟需的設施。許多科學家相信，這只是因為努力不夠，而投入SETI的資源也太少。有了這些新資源和新資料的注入，SETI計畫已經成為較重要的科學計畫。

我們可以相信，在本世紀內，人類將可以偵測到太空中智慧文明的訊號。在灣區的SETI研究所主任賽斯‧修斯塔克（Seth Shostak）對我說，他預期在二十年內將會與這種文明接觸。那或許過於樂觀，但保守地說，如果在這個世紀之內我們沒有偵測到來自太空另一個文明的訊號，那也將是很奇怪的事。

如果發現了來自先進文明的訊號，那將是人類歷史上最有意義的里程碑之一。好萊塢電影喜歡描述這個事件可能引發的混亂，還有預言告訴我們末日已近，瘋狂的宗教迷信則進入倒數計時等等。

不過，現實則很平常。不會有立即性的痛苦，因為這個文明可能還不知道我們在偷聽他們的對話。即使他們知道了，考慮到雙方的距離實在遙遠，他們和我們之間的直接對話也將極為困難。第一，那將花費數月至數年來完全為訊息解碼，然後為這個文明分級，看看是否符合卡達謝夫的分類。第二，由於距離此一文明將有許多光年，太遠而無法做任何直

接接觸，因此可能也不會有直接的溝通。所以，我們將只能觀察這個文明，而非進行任何對話。將會有人致力於建立巨大的無線電發射台，可以將訊息送回外星人。但事實上，與此一文明之間的雙向溝通，將還要再等好幾個世紀。

新分類

卡達謝夫分級法於一九六○年代提出，那時科學家關心的是能量的產出。不過，隨著電腦運算力的驚人提升，注意力轉到資訊革命，一個文明處理的位元數量與文明等級的相關性，變得與能量產出同等重要。

例如，我們可以想像一個外星文明，在一個大氣會導電的行星上，不可能使用電腦。在此情況下，任何電器都會迅速短路，引起火花，所以只可能使用很原始的電器。

任何大型發電機或電腦都會很快燒壞。我們可以想像這種文明，可能最終會掌控化石燃料或核子能，但他們的社會將無法處理大量資訊。他們將很難創立一個網路系統或行星電訊系統，所以他們的經濟和科學的發展將會是遲緩的。雖然他們也有可能在卡達謝夫的分級表中升級，但沒有電腦，過程將極緩慢而痛苦。

因此，卡爾˙薩根依據資訊處理制定了另一個量表。他設計了一個以英文字母（從A到Z）與資訊相對應的系統。A型文明只能處理一百萬個資訊，與一個只有語言而無文字的文明相對應。如果我們將古希臘時代留存的所有資訊（文字和文學昌盛）編輯在一起，約有十億位元的資訊，可以歸類為C型文明。由此量表向上，可以推估我們文明的資訊總量。依據經驗猜測，我們應屬於H型文明。因而我們文明的能量和資訊處理屬於○˙七H型文明。

近年來，另一個令人關心的議題浮現：污染和廢棄物。能量和資訊已不足以為文明分級。事實上，文明消耗的能量越多，以及它輸出的資訊越多，就會製造越多的污染和廢棄物。這不是一個學術性問題，因為第一型或第二型文明的廢棄物就可能足以毀掉它本身。

舉例來說。一個第二型文明會消耗一個恆星所產生的能量。假設它引擎的效能是百分之五十，那表示它所製造的半數廢棄物是熱量形式。這是

潛在的災難，因為它意味著這個行星的溫度會一直升高，直至它熔化。想像數十億個這樣的燃煤發電廠，吐出巨量的熱量和氣體，使得星球的溫度增高到生命無法存活。

事實上，戴森曾試圖透過搜尋主要是散發紅外線輻射，而非X光或可見光的物體，去發現外太空的第二型文明。這是因為第二型文明無可避免地會製造足夠的廢棄熱量，以致它會散發紅外線輻射——即使它要創造一個球體去隱藏，不讓窺探的眼睛看到也不可能。因而，他建議天文學家搜尋主要是製造紅外線光的星球系統。（不過，目前尚無發現。）

但這也引發我們關心到，任何文明放任其能量增加到失控，將會演變成自殺。因而，我們認為能量和資訊不足以確保文明在向上升級時存活。我們需要新的量表，一個將效能、廢棄熱量和污染列入考慮的量表。有一個有考慮到這些的新量表，是建立在另一個被稱為「熵」的觀念。

以「熵」為文明分級

我們想要的最理想狀況是：做得漂亮，只要能量和資訊成長的文明，而不至於使地球變熱，令人難以忍受，或廢棄物氾濫。

這一點在迪士尼電影《機器人瓦力》（Wall-E）中有精彩的描述。在那遙遠的未來，地球實在被污染又剝蝕得不像話，我們乾脆把混亂拋在身後，踏上奢華的大飛船在外太空漂浮，過著自我耽溺的生活。

熱力學定律在這裡變得很重要。熱力學第一定律只是說，你不可能憑空得到某件東西，如：沒有免費的午餐。換句話說，宇宙的總物質和能量是個常數。但如同我們在第三章所說，第二定律事實上最有趣，並且最終會決定一個先進文明的命運。簡單說，熱力學第二定律說，熵（指失序或混亂）的總量始終都在增加中。這意味著所有的東西必成過去，物體必將腐化、衰亡、生鏽或分解。我們不會看到熵的總量減少。例如，我們不會看到煎蛋從煎鍋跳回蛋殼中。我們不會看到糖在咖啡杯中結晶，突然不再混合而跳到你的湯匙中。這些事件如此罕見，因而英語（或任何其他語言）中沒有「混合後復原」（unmix）這樣的辭彙。

所以如果未來的文明，在上升到第二型或第三型文明過程中，盲目地製造能量，他們將會創造太多廢棄熱量，以致於他們居住的行星變成不能

居住。熵（以廢棄熱量、混亂和污染的形式）將實質地毀滅他們的文明。類似地，如果他們透過砍伐整片樹林來製造資訊，產生堆積如山的廢棄紙張，文明將會埋葬在他們的資訊垃圾中。

因此，我將介紹另一種文明分級的量表，而這其中有兩種新類型的文明。第一種是「熵節約」（entorpy conserving）文明——一種對它的垃圾用盡辦法處理，以控制過量的廢棄物和熱量的文明。當其所需能量繼續以指數成長時，它將會發現，它所消耗的能量可能改變行星環境，使生命變成不可能。先進文明所製造的混亂或熵總數將持續攀高，那是無可避免的事。但如果他們應用奈米科技和可再生能源去消除垃圾和不佳效能，則行星上地區性的熵可以降低。

第二種文明——一種「熵浪費」（entropy wasteful）文明——繼續無限制地擴充其能量消耗。最終，如果居住的行星無法居住，這個文明可能拓展到其他行星，以逃離其過量消耗。但是在外太空創造殖民地的代價，將限制其擴充能力。如果熵的成長速度快過它擴展到其他行星的速度，它將面對災難。

從主宰自然到保護自然

如同我們前面提及，在古代我們是自然之舞的被動見證者，驚奇地注視著所有周邊的神祕。今天，我們像是自然的編舞者，能夠對自然的力量作小小的調節。到了二一○○年，我們將成為自然的主宰者，能夠以念力移動物體、控制生死並前往其他星球。

但如果我們成為自然的主宰者，勢必也應當成為自然的保護者。如果讓熵無限制地增加，我們將無疑地被熱力學定律所毀滅。依據定律，第二型文明消耗幾乎與恆星等量的能量，如果不限制熵的增加，行星的表面溫度將會熱到極點。但，也有方法可以控制熵的增加。

例如，當我們去參觀博物館，看到十九世紀巨大的蒸汽機，有巨大的鍋爐和整車的煤炭。我們知道它們是多麼沒有效率，浪費能量並產生大量的熱能和污染。如果將它們與安靜、時髦的電動火車作比較，我們會發現今天對能量的運用有效率多了。如果人們的電器可以透過再生能源和小型化，增加其能量效率，則對巨大燃煤發電廠的需求可以大量降低，不再將大量的廢棄熱量和污染物吐到空中。奈米科技給我們降低廢棄熱

能的機會，如果機器縮小到原子的規格，還可以更進一步。

如果室溫超導體能在本世紀被發現，那就表示能量需求會有徹底改革。廢棄熱能（以摩擦的形式）將會大量減少，增加了機器的效率。如前面提及，我們的能量消耗主體（特別是交通），是用來克服摩擦的。這就是為什麼我們要在油箱加油——雖說如果沒有摩擦，從加州到紐約幾乎不需能量。可以想像，一個先進的文明將能完成比我們想像更多的工作，而使用的能量比我們現在用的更少。這意味著，我們可以為先進文明設定一個製造熵的限制數值。

最危險的轉移

從我們現在的零型文明，轉移到未來的第一型文明，可能是歷史上最大的轉移。它將決定我們到底是要繼續興盛繁榮，還是要因愚昧而毀滅。這個轉移極度危險，因為我們從沼澤痛苦地興起時，所有的典型殘忍野性依然存在。撕開文明的外衣，我們仍可看見基本教義派、宗派主義、種族主義和不容忍異己者等等力量在作祟。人類的本性在過去十萬年來並無很大的改變，除了現在我們擁有的核子、化學和生物武器可以刷新舊紀錄。

無論如何，一旦我們轉移進入第一型文明，我們將有許多世紀去適應改變。如前面各章提及，未來的太空殖民仍將極度昂貴，所以不太可能有相當數量的人會離開地球，前往火星或小行星帶殖民。直到徹底翻新的火箭設計降低了成本，或直到太空電梯建立了，太空旅行仍將是政府和富豪的玩意兒。對地球的大部分人來說，這表示在達到第一型文明時，他們仍然留在地球。這也意味著我們還要努力好幾個世紀才能成功地發展出第一型文明所帶來的不同生活方式。

搜尋智慧

這是一個令人興奮的年代。科學和技術為我們打開許多以前只能夢想的世界。未來的科學，儘管還要面對種種的挑戰和危險，但我也看到了真正的希望。未來數十年，我們對自然還會有更多發現，比歷史上的總和還要多——而且多好幾倍。

但，也非總是如此。

想想美國最後一個偉大的科學家和政治家班傑明·富蘭克林（Benjamin Franklin）的話——他不是在預測下一個世紀，而是未來一千年。一七八○年，他以惋惜的心情寫到，人類往往跟狼群一樣互相對待，主要是因為在惡劣的世界苟活所殘存的惱人負擔。

他寫道：「未來一千年，人類可以把東西帶到多高，實在很難想像。我們也許學會除去大部分的重力，給它們絕對的浮力，使交通變得容易。農業也許減少勞工而收穫倍增。所有的疾病不是被預防就是被治癒，連老年人也不例外，而我們的壽命可以愉悅地延長，甚至超過（《聖經》中所說的）大洪水以前的人的標準。」

他是在這樣的一個時代寫作——當農夫在泥土上挖掘令人沮喪的收穫、當牛車把腐敗的產品拖到市場、當瘟疫和飢餓是生活的現實，而且只有幸運的少數人能活過四十歲時。（一七五○年在倫敦，三分之二的兒童在五歲以前死亡。）富蘭克林就是生活在這種看來沒有希望，只盼有一天能解決這些老問題的時代。另外，也如湯瑪斯·霍布斯（Thomas Hobbes）於一六五一年所寫，生命是「孤獨、貧困、齷齪、殘酷而又短暫」。

但在今天，富蘭克林的一千年還要很久才會來，他的預測已經應驗。

「理性、科學和智慧會將我們從過去的壓迫解放出來」的這個信念，在馬奎斯·孔多塞（Marquis de Condorcet）一七九五年的作品《人類心靈進步史圖像素描》（Sketch for a historical Picture of the Progress of Human）中有所呼應。其中的一些看法，是所有對未來預測的文獻中最準確的。他做了廣泛的預測，當初看來相當離經叛道，但後來都成為事實。他預測新世紀的殖民地最後會脫離歐洲，獲得自由，然後受益於來自歐洲的技術，快速進步。他預測所有的地方都會終止奴隸制度。他預測我們將不再受日常生活折磨，並有較多的休閒時間。他預測生育控制的觀念會有廣為散布的一天。

在一七九五年，這些預言似乎沒有實現的希望。

富蘭克林和孔多塞都生活在一個生命短暫、野蠻和科學才剛萌芽的時代。回顧這些預言，我們可以全心感謝科學和技術所造成的快速進步。

是它們創造了足夠的物產和財富，提升了數十億人的生活，遠離過去的野蠻。回顧富蘭克林和孔多塞的世界，我們可以察覺，到目前為止的所有人類的發明中，最重要的就是科學的發明。科學已經將我們從深深的泥淖中解救，並將我們提升到眾星的門檻。

但科學並不是靜止的。如同前已提及，到了二一○○年，我們將會擁有我們所曾崇拜和害怕的神話中諸神的力量。特別是，電腦革命將會給我們用念力操控物體的能力；生物革命將給我們幾乎可以按照需求創造生命的能力，並延長我們的壽命；而奈米革命可能給我們改變物體形狀的能力，甚至從一無所有中創造出它們。所有的這些最終會將我們帶到第一型文明的創造。所以現在的這一代，是有史以來曾立足於地球上的人中最重要的一代，因為我們將決定，我們是否會到達第一型文明，還是陷入無底深淵。

但科學如同一把雙刃劍，它本身是道德中性的。劍的一邊可以砍掉貧窮、疾病和無知。但另一邊卻可以砍傷人。這支強大的劍如何運用，取決於握劍者的智慧。

如同愛因斯坦所說：「科學只能決定是什麼，而不能決定應當是什麼；超過這個範圍，價值判斷不可或缺。」科學解決某些問題，卻也創造了其他問題——但在更高層次。

在兩次世界大戰期間，我們看到了科學不完美和破壞性的一面。世界在恐怖中見證到，有了毒氣瓦斯、機關槍、對全城投擲燃燒彈和原子彈，科學可以帶來前所未見的大規模的廢墟和毀滅。二十世紀上半部的野蠻釋放的暴力，遠超乎我們的理解。

但科學已讓人類能夠重建，在戰爭的廢墟中興起，為數十億人民創造更大的和平與繁榮。所以科學的真正力量在於它使我們有能力，給我們更多的選擇。科學使我們的創新精神、創造力和永恆的人性放大，但對我們的重大缺點也是一樣。

未來的關鍵：智慧

因此，關鍵在於找到揮舞科學之劍所需的智慧。哲學家康德（Immanuel Kant）曾說，「科學是有組織的知識。智慧是有組織的人生。」我個人

認為，智慧是有能力認清當前關鍵性問題，從多種觀點和角度做分析，然後選擇能達成某些高貴目標和原則來實踐。

在我們的社會中，智慧來之不易。如同艾西莫夫曾說：「現在最讓人洩氣的是，科學獲取知識快過社會獲取智慧。」智慧不像資訊，它無法由部落格和網路聊天提供。由於我們沉溺於資訊的大洋中，現在社會最珍貴的東西就是智慧。沒有智慧和洞見，我們會被拋棄，漫無目標地漂流；沒有目標，在無數資訊的新奇消逝之後只會有空虛的感覺。

但智慧從何而來？智慧有一部分來自正反雙方進行理智的、有教養的民主辯論。這個辯論往往混亂、不得體、也往往刺耳，但通過風雨雷電，浮現真知灼見。在我們的社會，這個辯論以民主的形式浮現。如同邱吉爾發現：「民主是政府的最壞形式，如果不考慮之前所試過的所有政府形式的話。」

所以，民主並不容易。你必須去實踐它。蕭伯納曾說：「民主是一種手段，它確保我們在不比我們應得的還好的條件下被管理。」

今天，網際網路的錯誤和濫用的問題都已存在，卻以民主自由之監護者的身分浮現。我們曾經閉門辯論的議題，如今在成千的網站上被詳細評論和分析。

獨裁者生活於對網路的恐懼中，深怕人民起來反抗他們時要發生什麼事。所以在今日，當網路從恐怖的工具轉變為民主的工具時，對《一九八四》的恐懼已成過去。

在辯論的雜音中或許會浮現智慧。但要增強有活力的、民主的辯論，最明確的方式就是透過教育。因為，唯有受過教育的選民，才能對會影響到我們文明的科技做出決定。最終，人們會為自己做決定，接納這個科技多遠，以及應當向哪個方向發展。但也唯有見多識廣的、有教養的選民，才能夠明智地做這些決定。

不幸的是，許多人對於未來所面臨的巨大挑戰表現出令人悲哀的無知。我們如何創造新工業以取代舊工業？我們將如何為年輕人作好準備，去面對未來的就業市場？人類的基因改良工程應當走到什麼程度？我們應如何翻新我們已經衰敗、未能正常運作的教育系統，去迎接未來的挑戰？我們如何面對全球暖化和核子擴散？

民主的關鍵是有教養、有見識的選民，可以理性、冷靜地討論今日的議題。本書的目的，就是幫忙啟動將會決定這個世紀走向的辯論。

未來的運貨列車

總之，未來有待我們去創造。沒有什麼東西不能改變。如同莎士比亞在《凱撒大帝》（Julius Caesar）中所說：「錯誤，親愛的布魯特斯（Brutus），不在我們的星空中，而在我們自己……。」或者，如同亨利‧福特曾說的：「歷史或多或少胡說八道，它是傳統。我們不要傳統。我們要生活於現在，而唯一有價值的歷史，就是我們今天創造的歷史。」

所以，未來如同一列巨大的運貨火車，高速沿著軌道飛馳，奔向我們要去的地方。在這火車背後，是千千萬萬科學家的汗珠和辛勞，在他們的實驗室發明未來。你可以聽到火車的鳴笛。它說：生物科技、人工智能、奈米科技和電信。不過有些人的反應是說：「我太老了，我學不會這個玩意兒。我將只能躺下來，讓火車碾過去。」不過，年輕、有活力和雄心的人的反應則是：「讓我搭上火車！這列火車代表我的未來。它是我的命運。讓我來當司機吧！」

讓我們來期待，這個世紀的人民能明智地以熱情運用科學之劍。

為了進一步了解我們將如何生活於行星文明，如果能在二一○○年過一天，看看這些科技如何影響我們的日常生活和職業，以及我們的希望和夢想，那將會為我們帶來很多啟發。

譯注1：其餘約百分之二十三為暗物質。

第九章　二一○○年生活一瞥

從亞里斯多德到聖湯瑪斯‧阿奎那（Thomas Aquinas），「完美」指的是植基於經驗和關係的智慧，透過榜樣學習道德的生活。我們的「完美」不靠基因的改良，而在於品行的改進。

——史蒂芬‧波斯特（Steven Post）

二一○○年一月一日新聞

◎火星前哨基地請求更多補給。

◎第一批星艦已準備發射。

◎另一種已消失的動物即將加入地方動物園。

◎太空電梯，經過數年載運貨物上太空，現在開始允許限量的旅客前往外太空。

◎最舊的融合發電廠已有五十年歷史。

◎科學家正在小心監控突然從亞馬遜蹦出來的致命病毒。

◎在環繞曼哈頓的堤岸，有一條大裂縫被偵測出來。除非堤岸能夠修好，否則整個城市將如同過去的數十個城市一般被淹沒。

二一○○年一月一日上午六時十五分

經過除夕一整夜的狂歡，你正熟睡著。

突然間，牆面螢幕亮了起來。一個友善又熟悉的面孔出現在螢幕上。它是你最近買的軟體程式「茉莉」。茉莉愉悅地說：「起來吧，約翰。辦公室需要你，請親自出席，是重要的事。」

「等等，茉莉，你是在開玩笑吧，」你咕噥著抱怨，「這是新年第一天，我又有點宿醉，什麼事會那麼重要呢？」

慢慢地，你勉強起床，不情願地走到盥洗室。洗臉時，隱藏在鏡子、馬桶和洗臉盆裡的DNA和蛋白質感應器悄悄地活動起來，分析你的體液和呼吸時吐出的分子，在分子的層級檢查任何疾病最細微的徵兆。

離開了浴室，你在頭上戴上一些線圈，讓自己能夠用心電感應來控制你的家：你以念力提高了房間的溫度，選撥了一些柔和的音樂，叫機器人在廚房煮早餐並泡咖啡，你也命令磁浮車離開車庫，準備接你。當你進入廚房，你看到機器廚師的機械手臂，正在以你喜歡的方式為你煎蛋。

然後你戴上隱形眼鏡，連上網路。一眨眼，你看到網路就在視網膜前閃現。你一邊喝熱咖啡，一邊開始掃描閃現在隱形眼鏡上的標題。

☆火星前哨基地請求更多補給。火星上的冬天很快就要到了。如果移居者要完成下一階段的殖民，他們需要來自地球的更多資源，以便對付嚴寒的天氣。按照計畫，要把火星改造成地球般適合居住，第一階段是先提高火星的表面溫度。

☆第一批星艦已準備發射。數百萬個奈米機器人（每一個大約針頭的大小）將從月球基地發射，然後利用木星磁場快速繞行，前往最接近的恆星。這些奈米機器人將需要好幾年，才會有少數到達另一個恆星系統內的目標。

☆另一種已消失的動物即將加入地方動物園。這次是透過凍原中發現的DNA而帶回稀有的劍齒虎（saber-toothed tiger）。由於地球暖化，越來越多已消失的動物DNA被發現，被複製出來，充實了世界各地的動物園。

☆太空電梯，經過數年載運貨物上太空，現在開始允許限量的旅客前往外太空。由於太空電梯的開放，太空旅行的成本，近年已經降低到五十分之一。

☆最舊的融合發電廠已有五十年歷史。有些已經快到退役年限，準備興建新的加以取代。

☆科學家正在小心監控突然從亞馬遜蹦出來的致命病毒。目前，它似乎已經被限制在一個小地區，但尚未發現治療方法。很多科學家團隊正不眠不休地致力於基因排序，以了解其弱點，以及如何對付它。

忽然間，有一則新聞引起你的注意：

☆在環繞曼哈頓的堤岸，有一條大裂縫被偵測出來。除非堤岸能夠修好，否則整個城市將如同過去數十個城市一般被淹沒。

「哇，糟了，」你對自己說。「那就是辦公室打電話來叫醒我的原因。」

你略過早餐，趕快穿好衣服，衝出門。你的車子早已自行駛出車庫在外面待命。你以心電感應要求車子，儘快載你到辦公室。磁浮車立刻連上網路、GPS以及數十億隱藏在路上隨時監控交通狀況的晶片。

你的磁浮車靜靜地啟動，漂浮在超導體路面所產生的磁力墊上。茉莉的臉突然出現在車子的擋風板上。「約翰，辦公室的最新訊息，要你在會議室與大家會面。還有，你有姊姊給你的視訊留言。」

由於車子會自動駕駛，你有時間掃視姊姊的視訊信件。她的影像出現在你的腕錶上，並說：「約翰，記得這個週末我們要為凱文舉辦慶生會，他現在六歲了。你答應過他，要買最新的機器狗給他。順便跟你說，你現在有交往的對象嗎？我正在上網打橋牌，遇到了一個你可能會喜歡的人。」

「哦，哦，」你自言自語。

你喜歡開你的磁浮車兜風。不必擔心路面的隆起或坑洞，因為車子懸浮於路面之上。更棒的是，你幾乎不太需要加油，因為幾乎沒有摩擦力會減緩它。（你沉思著——實在搞不懂，在世紀初期居然還有能源危機。你搖搖頭，知道多數能量是浪費在克服摩擦之上。）

你記得當超導公路剛開放時，媒體在引介磁力的新時代時惋惜地說，熟悉的電力時代即將告終。事實上，你一點也不懷念電力時代。向外張望，看到時髦的磁浮車、貨車和火車，咻咻地在空中飛馳而過，你了解使用磁力是正確的，在過程中省了很多錢。

你的磁浮車從城市的廢物堆巡遊而過。你看到多數的廢棄物是電腦和機器人零件。由於晶片價格接近免費，甚至比水還便宜，所以過時的晶片就會被堆積在世界各地廢物場。已經有人在談論用晶片來填海造陸。

終於到達辦公室大樓了，這是一個大建築公司的總部。入內時，你幾乎未曾察覺，一道雷射光悄悄地核對了你的眼睛虹脈和識別你的臉。不再需要塑膠安全卡。你的身體就是身分證。

會議室幾乎是空的，只有少數同事圍坐在桌邊。但隨後，在你的隱形眼鏡中，與會者的3D影像迅速出現在桌子周圍。無法出席的人以全像照相術的影像出現。

你環視會議室，隱形眼鏡辨認了所有坐在桌邊的人，顯現出他們的履歷和背景。你注意到有好幾個大人物現身。你默默記下重要人物。

你的老闆的影像，突然出現在他的位子上。「各位先生，」他宣布，「你們可能已經聽說了，環繞曼哈頓的堤岸突然開始漏水。情況很嚴重，幸虧我們及時發現，所以沒有崩潰的危險。但，糟糕的是，我們先前送到水下去修堤的機器人失敗了。」

頃刻間，燈光變暗，你被水下的堤岸3D影像完全包圍。你完全浸沒在水中，海堤的巨大裂縫就在面前瞪著你。

當影像轉動時，你可以精確地看到漏水的部位。你看到海堤中有一個很大且奇怪的裂縫。「機器人已經無能為力，」你的老闆繼續說，「在它們的程式中沒有這種類型的漏洞。我們必須送有經驗的人下去那裡，以便掌握情況，並見機行事。我不說你們也知道，如果我們失敗，紐約會和其他已經在水下的大城一樣，蒙受相同的命運和痛苦。」

與會者無不心頭顫動。大家都知道，海平面上升的過程中，有哪些大城市已經被放棄。雖然好幾十年前，再生科技和融合發電已經取代化石燃料成為地球上的主要能源，人們仍然要蒙受上半世紀已經釋放在大氣中的二氧化碳的痛苦。

經過充分討論，決定送出由人操作的機器人修理隊伍。這就是你的介入點。機器人是你幫忙設計的。受過訓練的工人被放進艙房中，他們的頭部被電極環繞。他們大腦中的訊號可以與機器人作心電感應。從他們的艙房中，工人可以與機器人同步看到和感覺每一件東西。那就像是親自

到那裡一樣，但事實上是在一個新的超人身體中。

你有理由為自己的作品感到驕傲。這些透過心電感應操作的機器人，已歷經多次考驗證明其價值。月球基地就是大部分由人類工作人員控制。他們舒適而又安全地躺在地球上的艙房工作。但由於無線電訊號要經過大約一秒才能到達月球，那也表示這些工作人員必須接受訓練，以適應這個時差。

（你將會希望也把你的機器人，送到火星基地。但因為訊號要經過二十分鐘才能到達火星，然後再經二十分鐘回地球，所以結論是，與火星上的機器人溝通將過於困難。唉，我們的進步再大，有一件事你無法改變：光速。）

但在會議中，仍有某些事困惑著你。

終於，你鼓起勇氣打斷上司的話。「老闆，我很不想講，但看過這個堤中漏洞，我懷疑這裂縫像是我們的一個機器人留下的記號。」

室內的人開始竊竊私語，聲音吵雜。你可以聽到一致的反對聲浪：「我們的機器人？不可能。簡直荒謬透頂。這種事從未發生過。」大家都在抗議。

然後你的上司要大家安靜，並嚴肅地反應。「我很怕有人會提起這個問題，所以我必須說，這是很重要的事，必須嚴守祕密。這個消息在我們正式發布新聞以前，絕對不能洩漏出去。是的，這個裂縫是由我們一個突然失控的機器人所造成的。」

會議起了騷動。人們大搖其頭。怎麼會這樣呢？

「我們的機器人記錄完美，」你的上司堅持。「絕對沒有缺點。從來沒有一個機器人造成任何傷害。它們的安全保險裝置一再證明有效。我們堅持那個記錄。但如你所知，我們最新的一代先進機器人使用量子電腦，它是現有最強大的電腦，甚至逼近人類智能。是的，人類智能。而且在量子理論中，總是會有很小卻很確定的可能，會發生某種差錯。但在這次的個案中，它瘋了。」

你頹然坐下，被這個消息打敗了。

再度回家

真是漫長的一天，先是為前往修補海堤的機器人修理隊員編組，然後幫忙將所有使用量子電腦的實驗性機器人關閉——至少到這個問題解決為止。你終於又回到家了。你已精疲力盡。剛舒適地坐在沙發上，茉莉出現在牆面螢幕上。「約翰，布朗醫生要跟你說話。」

布朗醫生？你們這些機器人醫生要說些什麼？

「讓他上螢幕，」你對茉莉說。你的醫生出現在牆上的螢幕。「布朗醫生」看來太像真的，所以你有時會忘記他只是一個軟體程式。

「很抱歉打擾你，約翰，但是有一些事我必須提醒你。還記得去年的滑雪意外，幾乎把你殺死的那次？」

你怎能忘得了？想起在阿爾卑斯山的殘雪上滑雪，卻撞上一棵樹的情景，還是心有餘悸。因為山上大部分的雪已經融化，你不得不選擇一個海拔很高的渡假中心。由於對地形不熟悉，你意外地在滑雪斜坡摔倒，以時速四十英里撞進樹叢。哎喲！

布朗醫生繼續說：「我的記錄中顯示，你被撞得昏迷、遭受腦震盪以及嚴重內傷，但你的衣服救了你的命。」

雖然你沒有意識，但是你的衣服自動打電話招喚救護車，上傳你的醫療記錄，並精確地標出座標。然後在醫院中，機器人執行顯微手術止血，縫合血管的小裂縫，然後修補了其他傷口。

「你的胃、肝臟和腸受傷過度無法修補，」布朗醫生提醒你。「幸而，我們能及時培養一套新的器官給你。」

突然間，你彷彿覺得自己就是機器人，身體中有那麼多部分是來自組織工廠培養的器官。

「你知道，約翰，我的記錄顯示，你可以把傷害嚴重的手臂換掉，裝上全機械手臂。這種最新機器手臂，可以讓你的臂力增加五倍，但是你拒絕了。」

「是的，」你回答，「我猜我還是一個守舊的人。我會一直認為肌肉要比鋼鐵好。」

「約翰，我們必須為你的新器官做一個定期檢查。拿起你的磁振造影機，並讓它慢慢通過你的腹部。」

你走到盥洗室，拿起一個約一台電話大小的小器具，慢慢地讓它滑過腹部前。牆面螢幕立刻閃現你的體內器官的3D影像。

「約翰，我們要分析這些影像，看看你的復原狀態。順便告訴你，今天早上盥洗室的感應器偵測到，你的胰臟有癌症細胞在增長。」

「癌症？」你立刻坐直。你感到困惑。「但是，我想癌症好幾年前就已經被消除了。很少有人在談這種事了。我怎麼會有癌症呢？」

「事實上，科學家並未消除癌症。可以說，我們和癌症停戰了，處於僵持狀態。如同感冒，癌症也有很多種。我們也不可能消除它們。我們只是將它們包圍起來。我們已經命令某些奈米粒子去摧毀癌症細胞。你的癌症細胞只有幾百個，這也只是例行檢查。但若無這個干預行動，你可能會在七年內死亡。」他面無表情。

「喔，那就放心了。」你對自己說。

「是的，今天我們可以在腫瘤形成的好幾年前就發現癌症。」布朗醫生說。

「腫瘤？那是什麼？」

「哦，那是一個過時的字眼，用來形容一種晚期癌症。它差不多已經從我們的語言中消失了。我們不會再見到它們了。」布朗醫師說。

然後你發現，由於這些令人激動的事，你忘了姊姊威脅要設局將你與某人湊在一起的事。

「茉莉，我這個週末沒事，你能幫我找個約會對象嗎？」

「沒問題。你的偏好就儲存在我的記憶中。請等一下，我來搜尋網路。」一分鐘後，茉莉列出有可能的候選者——她們也正坐在她們的牆

面螢幕邊，正在問相同的問題。

掃視候選名單以後，你終於選出一個吸引你的人。這個人，名叫凱倫，看來蠻特別的，你對自己說。「茉莉，對凱倫提出禮貌性邀請，問她這個週末有沒有空。有一家剛開幕的餐館我想去試試。」

於是茉莉把你的視訊履歷送給凱倫。

那天晚上，你邀請幾個同事過來一起喝啤酒，一起看足球賽，輕鬆渡過。你的朋友本來可以用全像攝影的影像出現在你的客廳，和你一起看球賽，但是，與朋友興奮地親自現身為地主球隊加油歡呼，更加過癮。你笑著，想像數千年前洞穴人要培養感情時就是這麼做。

轉瞬間，整個客廳亮了起來，看來如同你已現身足球場，就在五十碼線上。當四分衛向前傳球時，你就站在他身邊。這個球賽就這樣在你身邊舉行。

半場休息時間，你和朋友開始批評球員表現。享受啤酒和爆米花的同時，你們熱烈辯論誰受過最多訓練，練習最下工夫，有最好的教練，以及受過最佳的基因治療。大家都同意，你們的地主隊有最頂尖的基因專家，又擁有金錢所能買到的最佳基因。

朋友離開後，你還是興奮得睡不著。所以你決定在睡前小玩一局撲克牌。

「茉莉，」你說，「很晚了，但是我想安排一場撲克牌遊戲。我有幸運的預感。應當有人在英國、中國、印度或俄國，現在也想玩幾回合。」

「沒問題。」茉莉說。一些有可能的臉孔出現在螢幕上。當每一個玩牌者的3D影像出現在你的起居室時，你想到要看看誰最能虛張聲勢。你告訴自己，你對來自數千里外遙遠國家的人的熟悉程度，反而超過鄰居，真是有趣。這年頭，國界已經沒什麼大不了。

終於，就在準備上床睡覺時，茉莉又打斷了你，出現在盥洗室的鏡子裡。

「約翰，凱倫接受了你的邀約。週末的事都已安排妥當。我會到新的餐

廳預定位子。你要看她的自我介紹嗎？你要我上網搜尋，以便查證她的自我介紹的正確性嗎？有些人會……哦……對自己的經歷做假。」

「不必，」你說。「就為週末保留一點新鮮感吧。」撲克遊戲之後，你又有幸運感了。

週末

週末到了，該去買禮物給凱文了。「茉莉，讓我看看購物中心。」

購物中心立刻出現在牆面螢幕上。你揮揮手臂和手指，螢幕上的影像就順著商場的一條路前進。你進行著虛擬旅行，到達玩具店的影像前。是的，他們正好有你想買的玩具機器寵物。你以心電感應命令你的車子帶你去購物中心。（你可以在線上購買；或者讓他們把型錄以電子郵件寄來，然後讓你的製造機使用可程式化物質在家裡從頭開始做出來。但是，偶爾離開公寓出去買東西總是好的。）

磁浮車悠然前進，你向外看，也有人在走路。天氣真好。你也看到各式各樣的機器人。有機器人在遛狗。還有機器人店員、廚師、接待員等等。好像只要是危險性、重複性或只需要簡單人際互動的工作，都可以由複製的機器人來做。事實上，現在機器人是很大的事業。到處都可以看到廣告，在徵求會修理、服務、升級或製造機器人的專業人士。所有從事機器人學領域的人，都是前景看好。機器人行業早已大於上一世紀的汽車工業。你也知道，大部分機器人居於幕後，安靜地修理都市的基礎建設，和維持著最基本的服務。

當你到達玩具店，一個機器店員在門口跟你打招呼。「需要幫忙嗎？」它說。

「是的，我要買一隻機器狗。」

你瀏覽最新的機器狗。你告訴自己，這些機器寵物的本事還真令人訝異。它們會玩、會跑、會把拋出的東西啣回來，凡是狗能做的事它都做得來，除了在地毯上尿尿。也許那正是父母為孩子購買它們的理由，你如此默想。

然後你對機器店員說，「我想為六歲的外甥買一隻機器狗。他是一個聰明又愛親自動手做的孩子。但是有時也很害羞而安靜。哪樣的狗可以幫他多交些朋友？」

機器人回答說，「很抱歉，先生。那超過了我的處理範圍。也許你會對太空玩具有興趣？」

你忘了，不管能力多好的機器人，若要了解人類行為，還有很長的路要走。

然後你到男性用品部門。如果要讓約會對象有好的印象，你那套破舊的套裝也該換了。你試穿一套設計家製作的衣服。它們看來很時髦，但尺寸不對，使你很失望。但你拿出信用卡，其中有你身體的精確3D尺寸。你的資料送進電腦，然後工廠已經開始裁剪，很快就會將衣服送上門。每一次都是恰到好處。

最後，你到超市去。你掃描市場內藏在塑膠板後的晶片，然後在你的隱形眼鏡中比價，看看城裡哪家店最價廉物美。誰的價格最低已經不用再猜測。

約會

整個星期，你期盼著約會的到來。當準備著與凱倫會面時，你很訝異，感覺彷彿回到了學生時代。你決定，如果之後要邀請她到你的公寓約會，就必須徹底更新破舊的傢具。幸而，多數廚房櫃台和起居間的傢具都是用可程式化物質做的。

「茉莉，」你說，「可以讓我看看工廠提供的新廚房櫥櫃和傢具目錄嗎？我要對傢具重新進行程式化。它們看來太陳舊。」

很快地，最新傢具設計圖已經閃現於螢幕上。

「茉莉，請下載廚房櫥櫃、那張沙發和這張桌子的藍圖，然後安裝它們。拜託了。」

當你為約會準備停當，茉莉下載了那些藍圖。頃刻間，廚房的工作台

面、起居間沙發和桌子開始分解，變成像是灰泥一般的東西，然後又逐漸重新形成新的式樣。一小時內，你的公寓已經煥然一新。（最近，你曾上網搜尋房地產訊息，注意到可程式化物材已經很流行。事實上，在你的工程公司，有一個深具雄心的計畫，要在沙漠打造一個完全由可程式化物材建造的城市。只要一次按鈕，然後——啪！——一個速成城市。）

看來看去，你認為自己住的公寓還是有點缺乏生氣。你一揮手，壁紙的樣式和色彩立刻改變。你對自己說，擁有智能壁紙確實比重新粉刷牆壁好多了。

你在路上匆匆買了花，終於接到約會對象。你既高興又驚訝，心砰砰地跳著。

晚餐時，你知道了凱倫是個藝術家。她開玩笑地說，在正常情形下，她應當是個身無分文、餓肚子，在路邊販賣著廉價畫作的畫家。不過，她是個成功的網站設計師。事實上，她擁有自己的公司。看來好像每一個人都想要有一個最新設計的網站。創造性藝術的需求非常巨大。

她用手指在空中畫了幾個圈，於是她的一些動畫作品出現在空中。「這是我的一些最新作品。」她驕傲地說。

你提出看法。「你知道，作為一個工程師，我整天和機器人一起工作。它們有些很進步，但也不時會做出愚蠢的舉動。在你的領域情況如何？機器人開始侵入了嗎？」

「根本沒有。」她肯定地說。凱倫說，她只跟有創意的人工作。在藝術領域，最有價值的物品就是想像力，那是最進步的機器人也缺乏的東西。

「我也許有點守舊，但在我的領域中，我只用機器人做影印或瑣事。」她驕傲地說。「我樂於見到，有一天機器人可以做一些有原創性的事，例如說一個笑話，寫一篇小說，或創作交響樂。」

那還沒發生，但應當會有，你默默地想著。

她正在說話時，你的心頭浮現了一個問題。她幾歲了？由於老化過程在

數年前開始可由醫藥減緩，光由面相已看不出年齡。她的個人網頁並未標示年齡。但她看起來不像超過二十五歲。

將她送回家以後，你開始無所事事地做起白日夢。跟一個像她那樣的人生活在一起，日子會怎樣呢？要跟她一起渡過未來的日子嗎？但是有一件事困擾著你，這件事整天糾纏著你。

你對著牆面螢幕說，「茉莉，幫我打電話給布朗醫生。」你突然很感謝機器人醫生可以隨時上門看診。而且，機器醫生從不抱怨或肚子痛。那不在程式之內。

布朗醫生很快地出現在螢幕上。「你有什麼不舒服嗎，孩子。」他以父執輩的口吻問。

「醫生，我必須請教你一個問題，它最近很困擾我。」

「可以，什麼問題。」布朗醫生問。

「醫生，」你說，「你認為我可以活多久？」

「你是指你可能活著的預期壽命？其實，我們並不知道。你的記錄顯示你現在七十二歲，但生理上你的器官比較接近三十歲。你是第一代受惠於基因重新程式化，可以活得更久的人。你選擇在三十歲左右停止老化。你們這一代還沒有足夠的死亡統計，以致我們沒有足夠的資料可以推估。所以，我們沒有辦法知道你會活多久。」

「那你認為我會永遠活下去嗎？」

「長生不老？」布朗醫生皺起眉頭。「不，我不以為會這樣。一個長生不老的人，和一個壽命很長但未曾正確衡量的人，兩者有很大的不同。」

「但如果我不老化，」你反駁說，「那我怎能知道哪一天我會……」你話沒說完。「好吧，……告訴你，我剛剛遇到了一個人，她很特別，假如我打算跟她一起過一輩子，我的這個人生階段該如何去適應她？如果我的這一代還不知道什麼時候會死，」你繼續說，「那我怎麼知道什麼時候可以結婚，有小孩，並計畫退休？你了解吧，我想知道如何設定我

的人生里程碑？」

「我不知道答案。你要知道，現在的人類有點兒像是幾內亞豬，」布朗醫生說。「對不起，約翰。你的航程已經到達航海圖沒有標示的位置。」

以後幾個月

接下來幾個月對你和凱倫都是令人驚喜的意外。你帶她到虛擬實境店，渡過了一段很棒的、看似荒唐的、如幻想般的時光，恍如回到童年。你們進入一個空曠的房間。軟體的虛擬世界投射到你們的隱形眼鏡，景色驟然改觀。在一個程式中，你們要逃離恐龍，但是不管逃到哪裡，都會有另一隻恐龍從樹叢裡冒出來。在另一個程式中，你們與試圖登上你們船的外星人或海盜作戰。換一個，你們決定變種並變形成為老鷹，翱翔天際。在另一個程式中，你們在浪漫的南海島上日光浴，或者在月光下起舞，而且有音樂柔和地從空中飄來。

過了不久，你和凱倫想要嘗試新事物。你們決定不再過想像的生活，而是真實的生活。所以當你們有時間一起渡假時，你們決定來一趟旋風式的歐洲之旅。

你對牆面螢幕說，「茉莉，凱倫和我想去歐洲旅行。是真實的旅行。請查看班機、旅館和任何特別值得注意的事項。然後列出可能有興趣的表演或活動。你知道我們的口味。」幾分鐘內，茉莉已經準備好行程細節。

後來，你們走過古羅馬廣場的廢墟時，也看到羅馬帝國在隱形眼鏡中復活。走過散亂的圓柱、石頭和碎片時，你也看到了曾是榮耀高峰的強大羅馬。

購物是愉快的，即使是在義大利的地方小店討價還價也一樣。你可以清楚地看到翻譯文字在正和你交談的人下面出現。你不需要任何導遊手冊，或笨拙的地圖。

夜裡，注視著羅馬的夜空，你可以清楚地看到星星在你的隱形眼鏡中排列成星座。向天空望去，你可以看到土星的光環、高高聳立的彗星、美

麗的氣體雲和爆炸的星星等的放大影像。

有一天，凱倫終於吐露了一個祕密——她的真實年齡。是六十一歲。不知為什麼，那已經不太重要了。

「所以，凱倫，活得這麼久，有沒有使你覺得快樂些？」

「有哇，有哇！」她立刻回答。「告訴你，在我祖母的時代，婦女結婚後，有了家庭，往往就要在事業上有所犧牲。但我很喜歡我已經三度年輕化的那種感覺，我換了三種工作，從不回顧。首先，我從事導遊工作，到過很多國家，旅行全世界。那是很棒的生活。觀光事業規模龐大，工作充足。但後來，我想做一些較有意義的工作。所以我成了律師，為我關心的個案及相關的人辯護。然後，我決定讓我藝術家的那一面也能被滿足一下，於是創立了我的網頁設計公司。你知道嗎？我很驕傲地說我從不使用機器人。沒有一個機器人會既成為導遊，又贏得法律訴訟，還能創作出美麗的藝術作品。」

時間會證明一切，你內心在想。

「那你有第四段生涯規劃嗎？」你問。

「這個嘛，如果有比較好的出現，也許會考慮。」她對你微笑。

「凱倫，」你終於說，「如果我們停止老化，那你怎麼會知道什麼時候最適合，啊，我是說，適合結婚，生小孩，並建立家庭？生理時鐘在數十年前已經不管用了。所以，我在想，也許是該定下來成家的時候了。」

「你是說生小孩？」凱倫說，有點吃驚。「我從未認真想過這種事。不過，到目前為止，是這樣。那要看有沒有對的男人出現。」她淘氣地對著你說。

不久，你和凱倫討論結婚，為孩子取什麼名字，以及你要孩子有什麼基因。

你到牆面螢幕前並說，「茉莉，你可以給我政府批准的最新基因表嗎？」當你掃視那份名單，你看到現在可以提供髮色、眼睛顏色、身

高、身材以及某些人格特質相關的不同基因。名單似乎每年都在增加。你也看到一長串的遺傳疾病名單。由於你的家族數百年來都有囊性纖維症的遺傳，現在不必再為它擔憂，可以鬆一口氣了。

掃視那份批准名單，你不僅覺得自己是個未來父母，也有點像神，照自己想像的形象訂做孩子。

然後茉莉說，「現在有一個程式，可以分析嬰兒的DNA，然後提供合理接近的嬰兒面孔、體型和人格。你要下載這個程式，看看你未來的孩子是什麼模樣嗎？」「不必了，」你說，「有些事應當保留一點神祕。」

一年後

凱倫懷孕了，但她的醫生保證說，搭乘剛剛為旅客開放的太空電梯並無危險。

「告訴你，」你對凱倫承認，「我小時候，一直想要到外太空去。也就是，當太空人。但有一天，我想到要坐在數百萬噸有揮發性的火箭燃料上方，只要一點點火花就會爆炸。於是，我對太空旅行的狂熱就開始冷卻了。但是太空電梯不同。清潔、安全，也不會混亂。搭乘它就對了。」

當你和凱倫進了太空電梯，你看到操作人員按下一個像是「上」的按鍵。你還以為半路會看到像是百貨公司的女性內衣部。結果不是，你感覺自己飄浮進入外太空。在快速進入空中時，你感覺到緩慢的加速。電梯的測量儀器顯示，「十英里，二十英里，三十英里……」

在外面，你看到的景色每一秒鐘都在改變。一剎那間，你進入大氣層，注視著鬆軟的雲飄過。然後天空由藍色轉為紫色，再轉為深黑色，然後終於看到星星在四周閃亮發光。你開始為遠方鮮明且前所未見的星星，組合成星座加以命名。這些星星並不像地面所見一般閃爍著，卻是顯眼明亮，一如過去數十億年。

電梯慢慢到達離開地面約一百英里的一個休息站。從太空，你看到了過去只能在圖片中見到的耀眼景象。

向下看，你突然看見地球在新的光線照射下。你看到了海洋、大陸，以及百萬人口大城的光亮射向太空。

從太空看來，地球顯得如此的靜謐，令人很難置信，人們曾經為了邊界以兵戎流血相向。這些國家仍然存在，但它們似乎奇特而有趣。在這個即時而又無所不在的通訊時代，國家已經不太重要。

當凱倫將她的頭依偎在你的肩膀上時，你開始領悟到，你正在見證一個新的行星文明的誕生。而你的孩子，將是這個新文明第一代公民的一員。

然後你從背包中取出一本老舊且已經有點磨損的書，為她誦讀一段百年前已作古的人的話。它提醒了你，人類在到達行星文明前所面臨的挑戰。

聖雄甘地（Mahatma Gandhi）曾經寫道：

暴力的根源：

有財富而無勞作，

有享樂而無良知，

有知識而無品性，

有商業而無道德，

有科學而無人性，

有崇拜而無犧牲，

有政治而無原則。

譯後小記

翻譯這樣的一本大書，其中最新科技名詞隨處皆是，人名一大堆，如同在泥淖中長程跋涉，非常痛苦。但這件事對我可說是自作自受。這本書是我從紐約帶回來，主動向時報前總編輯林馨琴請命。

我從事翻譯，有其使命。首先是為自己而譯。享受慢讀、細思、成長的過程。就此而言，我的確也很享受。我的理想是要在科學著作中注入文學的元素，以增加可讀性。所以，翻譯過程中有過一次文學性潤飾加工。

作者真正做到能近取譬，由已知推向未知，做到深入淺出，興味橫生。其中對希臘神話和科幻電影的引述，尤其精彩。

作者／加來道雄（Michio Kaku）

譯者／張水金

出版／時報文化出版企業股份有限公司

數位出版、發行／聯合線上股份有限公司

udn數位閱讀網　http://reading.udn.com

E-mail／ebook@udn.com